

Simulation von instationären U-Bootbewegungen mit Hilfe von dynamischen Rechengittern

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Thorsten Skrzypczak
aus
Duisburg

Referent: Prof. Dr.-Ing. Moustafa Abdel-Maksoud
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dieter Hänel

Tag der mündlichen Prüfung: 20.06.2008

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme, an der Universität Duisburg-Essen in Zusammenarbeit mit der Howaldtswerken-Deutsche Werft GmbH in Kiel.

Für die Unterstützung, die ich während meiner Tätigkeit von vielen Seiten erfahren habe möchte ich mich herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor M. Abdel-Maksoud für die kontinuierliche Betreuung und Förderung meiner Tätigkeit am Institut, sowie Herrn Professor D. Hänel für die gewährte Unterstützung.

Ebenso möchte ich mich sehr herzlich bei meinen Kollegen am Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung, sowie für die anregenden Diskussionen und das freundschaftliche Arbeitsklima bedanken.

Ganz besonders möchte ich meiner Familie danken, für die Unterstützung meines Studiums und die fortwährenden Ermutigungen die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Duisburg, im Sommer 2008

Thorsten Skrzypczak

Zusammenfassung

Das Strömungsfeld um ein manövrierendes Unterseeboot wird stark von der Dynamik des Bootes beeinflusst. Die Berechnung der Umströmung eines Unterseebootes, aufgrund der Komplexität der Geometrie mit vielen Anhängen und Aufbauten, stellt hohe Anforderungen an die Berechnungsmethode.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, das die Bewegungssimulation von Unterwasserfahrzeugen mit Hilfe von RANSE-Berechnungen ermöglicht.

Das Ziel, eine Berechnungsmethode zur Simulation von Bootsmanövern zu entwickeln, welches die Strömung mit einem vorhandenen RANSE-Berechnungsverfahren berechnet, wurde realisiert. Die verwendete Methode zur Umsetzung der Bewegungen im diskretisierten Rechengebiet unterliegt keinen räumlichen Restriktionen, so daß es auch die Betrachtung räumlich ausgedehnter Bootsmanöver zuläßt, was bisher in diesem Umfang mit anderen Methoden noch nicht möglich war. Dies wird durch die Verwendung eines beweglichen Rechengitters möglich, das sich frei im Raum bewegt. Während der Berechnung kann die Gitterqualität konstant gehalten werden, da sie nicht durch die Gitterbewegung beeinflusst wird. Da das Rechengitter, mit Ausnahme der Ruderumgebung, keiner geometrischen Änderung unterliegt und keine Interpolations- oder Rundungsfehler an der Außenberandung auftreten, sind die Berechnungsergebnisse zu jedem Zeitpunkt von konstanter Qualität.

Eine große Herausforderung stellte die Realisierung der beweglichen Ruder im Rechengitter dar. Dafür wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Bewegung realer Rudergeometrien ermöglicht. Die Implementierung der Ruderbewegung, auch von komplexen Rudergeometrien in die Berechnung viskoser Strömungen, erweitert die Simulationsmöglichkeiten um einen wichtigen Teil. Die durch die Anstellung der Ruder erzeugten Ruderkräfte können analysiert werden und für die Bewegungssimulation herangezogen werden. Durch

die Vorgabe eines Propellerschubes und durch das Auslenken der Tiefenruder konnte erfolgreich der Beginn eines Abtauchmanövers eines freifahrenden Bootes simuliert werden. Die ermittelten Bewegungsdaten wurden mit Ergebnissen anderer Berechnungsverfahren validiert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Stand der Entwicklungen	2
1.3	Ziel der Arbeit	4
1.4	Entwicklungsbeitrag	5
1.5	Inhalt der Arbeit	6
2	Problembeschreibung	8
2.1	Bisherige Arbeiten	8
2.2	Starrkörper Bewegung	12
2.3	Bewegungsgleichungen	17
2.4	Strömungsberechnung	26
2.5	Kopplung von Strömungs- und Bewegungsgleichung	32
3	Dynamische Rechengitter	39
3.1	Simulation der Bootsbewegung mit Hilfe von starren Gittern	40
3.2	Simulation der Bootsbewegung mit Hilfe von verzerrten Gittern	41
3.3	Überlappende Gitter	44
3.4	Bewegte Gitter	45
3.5	Ruderbewegung	47
3.5.1	Gitterdeformierung	48
3.5.2	Überlappende Gitter	50
3.5.3	Neuvernetzung	51
3.5.4	Eigenständige Ruderdomain	52
4	Simulation der Bewegung bei vorgegebener Bahn	57
4.1	Einleitung	57
4.2	Simulation eines Notauftauchmanövers	57
4.2.1	Analyse der Bewegungsdaten	59
4.2.2	Realisierung der Bootsbewegung im Rechengitter	59
4.2.3	Generierung der Bahndaten	61

4.2.4	Berechnung mit einer Bootsgeometrie	62
4.2.5	Bewertung der Ergebnisse	63
4.2.6	Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf die Rollbewegung	67
4.2.7	Zusammenfassung der Untersuchung	69
4.3	Bootsbewegung mit Propellereinfluß	70
4.3.1	Einleitung	70
4.3.2	Berücksichtigung des Propellereinflusses durch Integration des Propellermodells	71
4.3.3	Beispielrechnung	74
4.3.4	Geradeausfahrt	74
4.3.5	Kreisfahrt	79
4.3.6	Zusammenfassung	81
4.4	Beispielrechnung mit Rudereinfluß	82
5	Simulation der Freifahrt	84
5.1	Einleitung	84
5.2	Beschleunigungsfahrt einer Testgeometrie	84
5.3	Z-Manöver mit einem Ellipsoid	87
5.4	Abtauchmanöver mit einer vereinfachten Suboff-Geometrie	91
5.5	Bewegungssimulation mit einer Suboff-Geometrie	92
6	Zusammenfassung und Ausblick	97
6.1	Zusammenfassung	97
6.2	Ausblick	100
7	Abbildungen	102
	Literatur	142

Abbildungsverzeichnis

1	Lage des bootsfesten Koordinatensystems	13
2	Mittelwert und Fluktuation turbulenter Strömungen [41]	31
3	Integrationsverfahren; Einschrittverfahren nach Euler (oben), und Mehrschrittverfahren (unten) [12]	34
4	Integrationsverfahren; Mehrschrittverfahren nach Runge-Kutta 4.Ordnung [12]	35
5	Algorithmus des Gesamtverfahrens	37
6	Anbindung der User Routinen	38
7	Massenfluss an einem kartesischen und an einem deformierten Gitterelement [41]	42
8	Methoden zur Realisierung von bewegten Körpern in numerischen Gittern; v.l. verzerrte Gitter, chimere Gitter, bewegte Gitter [41]	44
9	Hinterschiffsformen von Unterseebooten [9]	49
10	Domain Geometrie	52
11	Draufsicht auf die Domain	52
12	X-Ruderanordnung mit Spalt zwischen Ruder und Ruderstuhl	55
13	X-Ruderanordnung mit Spalt zwischen Ruder und Ruderstuhl	55
14	Bestimmung des Kegelsegmentes aus zwei Punkten und zwei Radien	56
15	Momentenverlauf um die Bootslängsachse	64
16	Verlauf der Kräfte, die auf das Boot wirken.	67
17	Momentenverlauf um die Bootslängsachse	68
18	Blade Velocity Diagram [43]	72
19	Bahndaten des Verdrängungsschwerpunktes	75
20	Bestimmung der Geschwindigkeit in Wandnähe [15]	76
21	Auf das U-Boot wirkende Strömungskräfte	81
22	Widerstandskurve der Testgeometrie bei Beschleunigung	85
23	Vergleich der Geschwindigkeitsverläufe	86
24	Geometrie des Ellipsoids	89
25	Normierte Wegstrecke in X-Richtung	90
26	Normierte Wegstrecke in Z-Richtung	90

27	Trimmwinkel über der Zeit	91
28	Bahnverlauf der vereinfachten Suboff-Geometrie	92
29	Bahndaten nach Bohlmann	95
30	Vorgegebene Bahndaten	96
31	Berechnete Bahndaten	96
32	Seitenansicht Klasse 209	102
33	Heckansicht Klasse 209	102
34	Seitenansicht Klasse 212	102
35	Heckansicht Klasse 212	102
36	Klasse 212 mit Ruderdomains	103
37	Klasse 212 mit Ruderdomains	103
38	0-Grad Stellung	103
39	40-Grad Stellung	103
40	-40-Grad Stellung	103
41	Halbschweberuder mit 0-Grad Ruderausschlag	103
42	Halbschweberuder mit -25-Grad Ruderausschlag	103
43	Konkav-Konvexer-Bahnverlauf am Interface	104
44	Interfacefläche im Ruderspalt	104
45	0-Grad U212	105
46	-10-Grad U212	105
47	10-Grad U212	105
48	20-Grad U212	105
49	Ruder mit Stromlinien 0-Grad	105
50	Ruder mit Stromlinien 40-Grad	105
51	Ruder mit Stromlinien -40-Grad	105
52	Boot Steuerbordansicht	106
53	Boot schräg von vorne	106
54	Gitter in radialer Ausdehnung	106
55	Gitterqualität im Nahfeld nach der Verzerrung	106
56	Rechengitter schräg von vorne gesehen	107
57	Rechengitter in der Seitenansicht	107
58	Rechengitter mit Zellen kleiner 20°	107

59	Kugelförmige Domain mit Bootsgeometrie	108
60	Geschwindigkeiten in der Domain	108
61	Geschwindigkeiten um das Boot	108
62	Flächenunterteilung der Außenhaut	109
63	Isofläche des Druckes, Steuerbord	109
64	Isofläche des Druckes, Backbord	109
65	Druck am Vorschiff nach 13,5 Prozent der Simulationszeit	110
66	Geschwindigkeiten in z-Richtung nach 34 Prozent der Simulationszeit Steu- erbord	110
67	Geschwindigkeiten in z-Richtung nach 34 Prozent der Simulationszeit Back- bord	110
68	Druck am Vorschiff nach 34 Prozent der Simulationszeit	111
69	Druck am Vorschiff nach 50 Prozent der Simulationszeit	111
70	Druck am Vorschiff nach 62 Prozent der Simulationszeit	111
71	Druck am Vorschiff nach 64 Prozent der Simulationszeit	111
72	Druckverteilung am Boot nach 32 Prozent der Simulationszeit	112
73	Druckverteilung am Boot nach 42 Prozent der Simulationszeit	112
74	Druckverteilung am Boot nach 57 Prozent der Simulationszeit	112
75	Druckverteilung am Boot nach 63 Prozent der Simulationszeit	112
76	Druckverteilung am Boot nach 72 Prozent der Simulationszeit	113
77	Druckverteilung am Boot nach 82 Prozent der Simulationszeit	113
78	Druckverteilung am Boot nach 90 Prozent der Simulationszeit	113
79	Druckverteilung am Boot nach 97 Prozent der Simulationszeit	113
80	Druckverteilung am Boot nach 72 Prozent der Simulationszeit	114
81	Druckverteilung am Boot nach 82 Prozent der Simulationszeit	114
82	Druckverteilung am Boot nach 90 Prozent der Simulationszeit	114
83	Druckverteilung am Boot nach 97 Prozent der Simulationszeit	114
84	Stromlinien bei Vorausfahrt in der Ausgangslage	115
85	Stromlinien bei Queranströmung	115
86	Geometrie der Klasse 212	115
87	Geschwindigkeiten um das U-Boot in Vorausfahrt	116
88	Geschwindigkeiten im Heckbereich in Vorausfahrt	116

89	Geschwindigkeiten um das U-Boot in Vorausfahrt	116
90	Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt absolut	117
91	Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt relativ zum Boot	117
92	Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt absolut	117
93	Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt relativ zum Boot	117
94	Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt absolut	118
95	Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt relativ zum Boot	118
96	Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt absolut	118
97	Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt relativ zum Boot	118
98	Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt absolut	119
99	Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt relativ zum Boot	119
100	Druckverteilung am Boot bei Geradeausfahrt	119
101	Druckverteilung am Boot bei Geradeausfahrt	119
102	Druckverteilung am Boot bei Geradeausfahrt	120
103	Druckverteilung am Boot bei Geradeausfahrt	120
104	Druckverteilung am Boot bei Geradeausfahrt	120
105	Druckverteilung am Boot bei Geradeausfahrt	120
106	Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt relativ zum Boot	121
107	Geschwindigkeiten um das U-Boot in Vorausfahrt	122
108	Geschwindigkeiten während des Drehkreises in mehreren yz-Ebenen	123
109	Geschwindigkeiten um das U-Boot im Drehkreis	124
110	Geschwindigkeiten am Boot nach 15 Sekunden	125
111	Druckverteilung am Boot nach 15 Sekunden	125
112	Geschwindigkeiten am Boot nach 18 Sekunden	125
113	Druckverteilung am Boot nach 18 Sekunden	125
114	Geschwindigkeiten am Boot nach 21 Sekunden	126
115	Druckverteilung am Boot nach 21 Sekunden	126
116	Geschwindigkeiten am Boot nach 24 Sekunden	126
117	Druckverteilung am Boot nach 24 Sekunden	126
118	Geschwindigkeiten am Boot nach 27 Sekunden	127
119	Druckverteilung am Boot nach 27 Sekunden	127
120	Druckverteilung am Boot nach 27 Sekunden	127

121	Druckverteilung am Boot nach 27 Sekunden	127
122	Druckverteilung am Boot nach 27 Sekunden	128
123	Geschwindigkeiten am Boot nach 27 Sekunden Backbord	128
124	Geschwindigkeiten am Boot nach 27 Sekunden Steuerbord	128
125	Druckverteilung am Boot nach 27 Sekunden Backbord	129
126	Druckverteilung am Boot nach 27 Sekunden Steuerbord	129
127	Geschwindigkeiten am Heck während des Drehkreises nach 20 Sekunden mit Ablösebereich	130
128	Bereiche gleicher Geschwindigkeiten hinter dem Propellermodell	130
129	Bereiche gleicher Geschwindigkeiten hinter dem Propellermodell im Dreh- kreis	130
130	Gitterverteilung auf der Suboffgeometrie	131
131	Gitterverteilung am Achterschiff bei Ruderausschlag	132
132	Geschwindigkeiten um eine Suboffgeometrie bei 0-Grad Ruderwinkel . . .	133
133	Geschwindigkeiten am Hinterschiff einer Suboffgeometrie bei 0-Grad Ru- derwinkel	134
134	Geschwindigkeiten um eine Suboffgeometrie bei 10-Grad Ruderwinkel . .	135
135	Geschwindigkeiten am Hinterschiff einer Suboffgeometrie bei 10-Grad Ru- derwinkel	136
136	Axiale Geschwindigkeiten um die Testgeometrie	136
137	Druckverteilung um die Testgeometrie nach 75 Iterationen	137
138	Druckverteilung um die Testgeometrie nach 190 Iterationen	137
139	Geschwindigkeitsverteilung um ein Ellipsoid	137
140	Geschwindigkeitsverteilung um die Testgeometrie nach 1 Sekunde	138
141	Geschwindigkeitsverteilung um die Testgeometrie nach 6 Sekunden	138
142	Geschwindigkeitsverteilung um die Testgeometrie nach 10 Sekunden . . .	138
143	Geschwindigkeitsverteilung um die Testgeometrie nach 12 Sekunden . . .	138
144	Druckverteilung am Rumpf nach 7 Sekunden	139
145	Geschwindigkeiten um den Rumpf nach 1 Sekunde	140
146	Geschwindigkeiten um den Rumpf nach 7 Sekunden	140
147	Geschwindigkeiten um den Rumpf nach 9,5 Sekunden	141

Tabellenverzeichnis

4.1	Aufbau der Tabelle	62
-----	------------------------------	----

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Umströmung eines sich bewegenden Körpers ist ein sehr komplexer Vorgang. Die dabei auftretenden Effekte zu verstehen und zu simulieren ist seit der Zeit von William Froude eine immer noch bestehende Herausforderung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Während im 19. Jahrhundert und in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts ausschließlich Modellversuche durchgeführt wurden, setzte mit der rasanten Entwicklung der Computerleistung auch die Entwicklung numerischer Simulationen ein. In den ersten Jahren wurde die Entwicklung von Widerstandsprognoseverfahren für stationäre Berechnungen vorangetrieben und die Zuverlässigkeit stetig erhöht und verbessert. Zeitgleich begann die Entwicklung von Bewegungssimulationen mit Hilfe von Bahndaten, die aus Modellversuchen gewonnenen wurden. Erst seit einigen Jahren besteht aufgrund der Fortschritte in der Rechenleistung und Verfahrensentwicklung die Möglichkeit, das instationäre Bewegungsverhalten zu untersuchen.

Genaue Kenntnisse über die Manövriereigenschaften von Unterseebooten sind von entscheidender Bedeutung für den sicheren Betrieb dieser Fahrzeuge. Dabei gewinnt die Vorhersage des Bewegungsverhaltens in einer frühen Entwurfsphase in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung, da so frühzeitig Probleme erkannt werden können und Kosten in der Entwicklung reduziert werden können. Im Gegensatz zu Überwasserschiffen bewegen sich Unterseeboote in allen sechs Freiheitsgraden, was im Bewegungsmodell berücksichtigt werden muß. Darüber hinaus können bei besonderen Manövern, Bauart bedingt, unerwartete Bootsbewegungen und Beschleunigungen auftreten, wobei sich die Bewegungsgrößen stark von denen bei Überwasserschiffen unterscheiden. So können bei Unterseebooten neben der vertikalen Bewegungsrichtung auch große Rollwinkel um die Bootsängsachse auftreten, die höher liegen können als bei Überwasserschiffen. Die numerische Simulation hilft dabei, den Einfluß der Geometrie auf das Strömungsverhalten, aber auch die wechselseitige Beeinflussung zu verstehen. Bereits in der Entwurfsphase kann der Einsatz von numerischen Simulationen Zeit und Kosten sparen.

Der Wellenwiderstand von Unterseebooten ist nicht, wie bei Überwasserschiffen, von

großem Interesse, so daß die Verwendung von potentialtheoretischen Verfahren für die Berechnung des Widerstands von tiefgetauchten U-Booten nur teilweise praktikabel ist, da diese Verfahren den Viskosenanteil nicht berechnen können. Für die Bestimmung des Reibungsanteils des Widerstandes werden Reibungsbeiwerte verwendet, die in Modellversuchen ermittelt werden oder beispielsweise über die Plattenreibung nach ITTC (International Towing Tank Conference) bestimmt werden. Strömungssimulationen für U-Boote erfordern daher die numerische Lösung der zeitgemittelten Navier-Stokes-Gleichungen in Verbindung mit einem Turbulenzmodell [5]. Die Verwendung von instationären, viskosen Strömungssimulationen gewährt Einblicke in die komplexe Umströmung die mit bisherigen experimentellen Methoden nur schwer oder unzureichend zu erzielen waren. Die bei manövrierenden Booten auftretenden Druckkräfte auf die Außenhaut können in der Großausführung nicht direkt bestimmt werden, da entsprechende Meßmethode sehr aufwendig sind. Dazu müßte die komplette Hülle mit Drucksensoren versehen sein, ohne jedoch die Umströmung des Körpers zu verändern. Die wirkenden Kräfte können in Modellversuchen nur an gefesselten Modellen ermittelt werden, was immer eine Strömungsbeeinflussung bewirkt. Informationen über den Kräfteverlauf am Rumpf liefern Modellversuche nicht. Die Druckverteilung auf der Außenhaut läßt sich im Modellversuch nur äußerst schwer und punktuell ermitteln. Für die Gewinnung detaillierter Informationen über das Strömungsfeld um einen Bootskörper ist daher die Anwendung moderner numerischer Verfahren für die Berechnung der viskosen Strömung von großem Vorteil.

1.2 Stand der Entwicklungen

Mit der steigenden Verfügbarkeit von Rechenleistung an Forschungseinrichtungen in den letzten zehn Jahren begann die numerische, viskose, instationäre Strömungssimulation von manövrierenden Unterwasserfahrzeugen. Dabei wurden verschiedene Methoden für die Gitterbewegung entwickelt. Die gebräuchlichsten Verfahren zur Berechnung von bewegten Körpern sind Gitterdeformierung, überlappende Gitter und Neuvernetzung von Rechengebieten.

Bei der Gitterdeformierung wird die zu bewegende Geometrie von einem Rechengitter umschlossen und in jedem Zeitschritt wird ein Teil der Gitterelemente mit der Geometrie mitgeführt, während die Begrenzung des Rechengebietes starr bleibt. Dadurch verursacht die Körperbewegung eine Deformierung der Volumenelemente zwischen dem Körper und der Begrenzung des Rechengebietes, die mit fortschreitender Rechendauer zunimmt. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die stabile Lösung der Strömungsgleichungen, da sowohl Einlaß- wie auch Auslaßbedingungen an den feststehenden Begrenzungen des Rechengebietes definiert werden können. Dabei wird häufig am Einlaß eine feste Anströmgeschwindigkeit vorgegeben und am Auslaß ein Druckrandbedingung gesetzt. Nachteilig bei diesem Verfahren ist, daß die Größe der Körperbewegung relativ klein zur Körpergröße selbst ist. Ebenso sind größere Rotationen der Geometrie nicht möglich, da ebenso wie bei großen Verschiebungen die einzelnen Gitterelemente zu stark deformiert werden. Durch die Verwendung von Interfaceflächen, die relative Bewegungen zwischen zwei Domains erlauben, können größere Bewegungen des Körpers erreicht werden. Dabei wird beispielsweise eine kugelförmige Domain über gleitende Interfaceflächen an das übrige Rechengebiet gekoppelt, wodurch Rotationen möglich werden. Die Begrenzung durch das Rechengebiet in horizontaler und vertikaler Ausdehnung bleibt aber bestehen.

Die Neuvernetzung von Rechengebieten ist eine oft gebräuchliche Methode zur Realisierung von Körperbewegungen bei instationären Rechnungen. Dadurch kann innerhalb vorgegebener Grenzen des Rechengebietes, das Rechengitter für jeden Zeitschritt neu erstellt werden und somit die Gitterqualität über einen beliebigen Zeitraum auf akzeptablem Niveau gehalten werden. Ein großer Nachteil ist, daß die Variablen aus dem alten Rechengitter jedesmal durch Interpolation auf das neue Rechengitter übertragen werden müssen, wodurch Ungenauigkeiten auftreten können. Ein weiterer Nachteil ist der Zeit- und Arbeitsaufwand, der für die Gittergenerierung erforderlich ist. Während die Gittergenerierung für Tetraedernetze weitestgehend automatisiert ist, bereitet die automatisierte Vernetzung komplexer Geometrien mit Hexaederelementen noch Schwierigkeiten.

Ein weit verbreitetes Verfahren bei der Berechnung beweglicher Körper mit Hilfe der

RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) Gleichungen ist die Verwendung überlappender Gitter. Dieses Verfahren wird auch als Chimera Verfahren bezeichnet. Dabei wird ein ruhendes Hintergrundgitter erstellt, auf dem sich der zu untersuchende Körper mit einem eigenständigen umschließenden Rechengitter bewegen kann. Das Rechengitter um die bewegliche Geometrie kann sich nahezu beliebig auf dem Hintergrundgitter bewegen, solange ein ausreichendes Interpolationsverfahren die Kopplung der beiden Rechengitter ermöglicht. Dabei stellt die Kopplung eine der Hauptprobleme dieses Verfahrens dar, da ein ständiger Informationsaustausch der zwei Rechengitter sichergestellt werden muß. Das bedeutet, daß die Informationen des einen Rechengitters auf die Elemente des anderen Rechengitters durch Interpolation übertragen werden müssen. Die Erhöhung der Effektivität der Kopplung und die Parallelisierung dieser Methode ist weiterhin Gegenstand aktueller Forschungen.

Alle drei Methoden wurden bisher einzeln oder in Kombination für instationäre, viskose Strömungssimulation eingesetzt. Die bereits erwähnten Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden führten zu unterschiedlichen Erfolgen, die aber auch immer von der verfügbaren Rechenkapazität abhängig waren. Von der verfügbaren Rechenleistung sind auch die Größe und die Qualität der Rechengitter abhängig, was in den bisherigen auf diesem Gebiet durchgeführten Arbeiten gezeigt wird.

1.3 Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Entwicklung eines numerischen Verfahrens zur instationären Berechnung und Simulation von manövrierenden Unterseebooten unter Berücksichtigung der Viskosität und entstand in Zusammenarbeit mit der Howaldtswerke Deutsche Werft GmbH. Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung viskoser Umströmung von manövrierenden Unterwasserfahrzeugen. Die numerischen Berechnungen erfolgen mit Hilfe eines zu entwickelnden Konzeptes zur Berücksichtigung der Bootsbewegung sowie der Relativbewegung zwischen Bootskörper und Ruder. Zusätzlich erfolgt die Einbeziehung des Propellereinflusses auf die Bootsumströ-

mung.

Eine gestellte Anforderung an die Gitterbewegung ist, daß auch extreme Manöver, bei denen die Drehbewegung um die Längsachse eine wichtige Rolle spielt, realisierbar sind, wie z.B. das Notauftauchen von Unterseebooten.

Das entwickelte Verfahren soll für die Berechnung unterschiedlicher Unterseebootsgeometrien zu verwenden sein und die Rudergeometrien der verschiedenen Bootstypen berücksichtigen können.

1.4 Entwicklungsbeitrag

Eine der Hauptanforderung dieser Arbeit bestand darin, für ein vorhandenes Programmpaket ein Konzept zu entwickeln, welches die Berechnung der instationären, viskosen Umströmung der freien Bewegung eines Unterwasserfahrzeuges gewährleistet. Dazu wurden unterschiedliche Methoden der Realisierbarkeit untersucht und eine Kombination aus verzerrten und beweglichen Gittern entwickelt und umgesetzt.

Die Realisierung beweglicher Ruder an realen Unterseebootsgeometrien war eine weitere Herausforderung dieser Arbeit, wie sie in anderen Arbeiten bisher noch nicht realisiert wurde, da die Platzverhältnisse um die Ruder an Unterseebooten sehr begrenzt sind. Erschwerend wirkte sich die komplexe Geometrie der Unterwasserfahrzeuge und die Anbindung der Rudergeometrien an den Rumpf auf die Konzeption der Rechengitter aus. Das Nachrechnen verschiedener instationärer weiträumiger Bootsbewegungen lieferte bisher noch nicht realisierte Einblicke in die Umströmung bewegter Unterseeboote im zeitlichen Verlauf. Dadurch werden Informationen wie beispielsweise die Änderung der Druckverteilung gewonnen, die für den Entwurf des Bootsrumpfes von großer Bedeutung sind. Durch die Lösung der Bewegungsgleichungen in sechs Freiheitsgraden und die Kopplung mit dem gegebenen Programmpaket zur Lösung der zeitgemittelten Navier-Stokes Gleichung wurde das Verfahren erweitert, um freifahrende Unterseeboote zukünftig zu simulieren. Aufbauend auf diesem Gitterkonzept wurde durch die Implementierung einer beweglichen Subdomain, die Möglichkeit der Einbindung eines am Institut entwickelten Propellermodells ermöglicht. Die vom Propellermodell gelieferte Schubwirkung wird

in den Bewegungsgleichungen als Vortriebskomponente genutzt. Ebenso werden durch die Implementierung der Ruderkräfte in das Bewegungsmodell die Kräfte, die durch die Änderung der Ruderwinkel erzeugt werden, in der Bewegungsgleichung berücksichtigt.

1.5 Inhalt der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Zu Beginn wird die Starrkörperbewegung beschrieben und das Vorgehen zur Lösung der Bewegungsgleichungen in sechs Freiheitsgraden vorgestellt. Im Anschluß wird das Verfahren der Strömungsberechnung dargelegt und die Besonderheiten des verwendeten Gleichungslösers beschrieben, bevor die Kopplung von Strömungs- und Bewegungsgleichung erörtert wird. Zur Realisierung von großen Starrkörperbewegungen gibt es in der numerischen Fluidodynamik verschiedene Ansätze. Die wichtigsten Methoden werden in Kapitel 3 vorgestellt und diskutiert. Für die Bewegungssimulation in dieser Arbeit wird eine Methode entwickelt, bei der das gesamte Rechengebiet ohne räumliche Limitation bewegt wird. Die Gitter für die einzelnen Seiten- und Tiefenruder sind über gleitende Interfaces an das bewegte Hauptgitter gekoppelt. Das entwickelte Verfahren erlaubt die Realisierung unterschiedlicher Ruderkonfigurationen und Rudertypen wobei die einzelnen Ruder unabhängig voneinander angesteuert werden.

Nach der Beschreibung der unterschiedlichen Verfahren werden die Ergebnisse der Simulationen mit einem vorgegebenen Bahnverlauf im vierten Kapitel vorgestellt. Die Ergebnisse validieren die Funktionalität der gewählten Methode zur Gitterbewegung. Durch die Simulation von schnellen Auftauchmanövern wird die Umströmung des Bootes untersucht und eine Ursache für die Erregung von Rollbewegungen ermittelt. Die Einbindung eines Propellermodells erlaubt die Berücksichtigung von Schub und Drall im Nachstrom eines Bootes, ohne jedoch die tatsächliche Propellergeometrie modellieren zu müssen.

Zur Realisierung eines frei manövrierenden Unterseebootes werden die Bewegungsgleichungen in allen sechs Freiheitsgraden gelöst. Die für die Boots- und Ruderbewegung entwickelten Routinen und Unterprogramme werden über das Memory Management System mit dem bestehenden Gleichungslöser verknüpft. Die mit einer vereinfachten Bootsgeometrie erzielten Ergebnisse werden im fünften Kapitel der Arbeit vorgestellt, bevor

mit den Ergebnissen eines validierten Rechenverfahrens am Ende der Arbeit die Funktionalität an einer Geometrie mit Aufbauten und beweglichen Rudern gezeigt wird. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf weitere Anwendungsmöglichkeiten, die das entwickelte Verfahren bieten kann.

2 Problembeschreibung

2.1 Bisherige Arbeiten

Die numerischen Rechenverfahren für viskose Strömungen bieten eine Möglichkeit, die oben genannte Wissenslücke, die bei reinen Modellversuchen besteht, zu schließen. Die Theorie für Newtonsche Fluide erlaubt die inkompressible Schiffsumströmung durch die Erhaltungsgleichungen von Impuls, Masse und Energie vollständig zu beschreiben. Die dabei auftretenden partiellen, nichtlinearen Differentialgleichungen werden jedoch nicht analytisch gelöst, sondern bis zu einer ausreichenden Genauigkeit numerisch approximiert.

Bisher wurden für die Untersuchung des Manövrierverhaltens von Unterseebooten Berechnungsverfahren mit Hilfe der Koeffizientenmethode verwendet. Die auf der Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten basierenden Methoden nutzen in vielen Fällen die Bewegungsgleichungen nach Gertler und Hagen [25], oder die von Feldmann [26] überarbeitete Version der Bewegungsgleichungen zur Berücksichtigung veränderlicher Massen. Bohlmann [11] stellt in seiner Arbeit ein analytisches Berechnungsverfahren zur Ermittlung der hydrodynamischen Koeffizienten vor und belegt durch den Vergleich mit Meßdaten aus PMM Versuchen die Tauglichkeit des Verfahrens. Dieses liefert für Standardmanöver von Unterseebooten gute Ergebnisse. Dabei bestimmt er den Reibungswiderstand der Körper mit Hilfe der ITTC Kennlinien und die Widerstandsbeiwerte mit Daten aus Modellversuchen. Die potentialtheoretische Betrachtung dient dabei zur Bestimmung des Auftriebes des Bootskörpers oder der unterschiedlichen Anhänge nach der Theorie schlanker Körper bei Schräganströmung [10]. Da bei der Ermittlung der Koeffizienten keine Rollbewegungen oder andere stark instationären Effekte berücksichtigt werden, können Manöver mit starken Rollbewegungen nur unvollständig prognostiziert werden. Die Vorhersage von Manövern mit starken instationären Strömungsanteilen wie Queranströmung oder Interferenzen zwischen Anhängen und Rumpf können diese Methoden nur eingeschränkt leisten.

Besonders die instationären Einflüsse, wie beispielsweise rotierende Propeller oder Wechselwirkungen mit Rudern, können durch moderne Berechnungsverfahren unter Berück-

sichtigung des viskosen Einflusses mit hoher Zuverlässigkeit untersucht werden [27], [28]. Müller [27] und Hachmann [28] verwenden in Ihren Untersuchungen stationäre Gitter für die Bootsgeometrie, in denen für den Propeller eine zylindrische Aussparung existiert. Dort wird die Propellergeometrie mit einem rotierenden Rechengitter eingepaßt, welches über Sliding-Interfaces an das stationäre Rechenggebiet gekoppelt ist. Die Verwendung des SST-Turbulenzmodells von Menter in Verbindung mit einer hohen Gitterqualität und die Verwendung der Zentralknoten bei der Diskretisierung, ermöglichen die Berechnung der Wechselwirkung zwischen dem Nachstrom des Bootes und dem Einfluß des arbeitenden Propellers.

Die Abweichungen die Bull [34] zwischen Messungen und Berechnungen an einer Unterseebootsgeometrie feststellte, konnten durch die Verwendung weiterentwickelter Turbulenzmodelle und verfeinerter Rechengitter reduziert werden [28]. Während Bull für seine Arbeiten das $k - \epsilon$ Turbulenzmodell einsetzt und mit einer Zellenanzahl von 250.000-1.000.000 ein für heutige Maßstäbe grobes Rechengitter verwendete, führt Hachmann seine Berechnungen mit dem weiterentwickelten SST-Turbulenzmodell nach Menter mit ca. 6.000.000 Volumenelementen durch, wodurch besonders die Bereiche mit hohen Geschwindigkeits- und Druckgradienten besser aufgelöst werden können. Durch die Simulation der Großausführung fällt der Einfluß des Maßstabeffektes weg, der ansonsten bei der Umrechnung von Ergebnissen aus Modellversuchen in Prognoseverfahren für die Großausführung zu berücksichtigen ist [29], [35]. Dieser Effekt tritt auf, weil im Modellmaßstab die Viskosität des Wassers nicht an die Modellgröße angepaßt werden kann, wodurch die Versuche mit wesentlich kleineren Reynoldszahlen durchgeführt werden, als sie bei der Großausführung auftreten. Das hat zur Folge, daß das Modell durch ein zu zähes Medium bewegt wird, wodurch die Grenzschichtdicke im Vergleich zur Großausführung zu stark ist.

An der Bewegungssimulation von Unterseebooten mittels RANSE arbeiten nur wenige Forschungseinrichtungen, so daß nur eine begrenzte Anzahl von Arbeiten veröffentlicht worden ist. Bellevre [30] zeigt in seiner Arbeit die ersten Ansätze für die Berechnung von Unterseebooten mittels RANSE. Dabei nutzt Bellevre die RANSE Berechnung zur Bestimmung der Manövrier-Koeffizienten des Bootes, und simuliert numerisch die dafür erforderlichen Modellversuche. Die quasi-stationären Berechnungen benötigen z.B. für die Simulation eines Drehkreises mehrere Rechengitter, die über eine automatische

Vernetzung erstellt werden. Darunter leidet die zu untersuchende Komplexität der Geometrie, da Anhänge nicht exakt genug betrachtet werden können, um deren Einfluß zu erfassen. Während das beschriebene Vorgehen zur Bestimmung der Querkräfte bei Schräganströmung gute Übereinstimmungen mit Modellversuchen liefert, stößt es bei der Bestimmung der Drehbewegung an Grenzen.

Die Problematik bei der RANSE Berechnung komplexer Unterseeboot Geometrien beschreibt Bull [31] in seiner Arbeit. Während bei einfachen Geometrien der Einfluß des Turbulenzmodells von untergeordneter Bedeutung ist, macht sich dieser bei komplexen Geometrien mit Anhängen besonders im Nachstrom bemerkbar. Die Ursache hierfür sind die bei komplexen Geometrien auftretenden stark unterschiedlichen Druck- und Geschwindigkeitsgradienten, die sich infolge der Anhänge und des Turms bilden. Die dabei auftretenden Geschwindigkeitsverteilungen werden stark durch das Turbulenzmodell beeinflusst. Die Unterschiede des RNG- und des $k - \omega$ - Turbulenzmodells zeigen sich besonders bei der Berechnung mit hohen Reynoldszahlen ($10^8 - 10^9$), wie sie bei der Berechnung in der Großausführung auftreten.

Den Einfluß der Turbulenzmodelle und der Gittergröße auf die Ergebnisse vergleicht Sung [33] mit Messungen aus Modellversuchen. Während stationäre Anströmungen gute Übereinstimmungen zeigen, treten bei stationären Drehkreisberechnungen erhebliche Abweichungen auf. Auch hier ist die Ausbildung des Totwassergebietes von der Wahl des Turbulenzmodells abhängig, da bei der Drift des Bootes instationäre Strömungseffekte auftreten, die vom Turbulenzmodell beeinflusst werden.

Eine Kopplung von RANSE Berechnungen für vereinfachte Unterseebootsgeometrien mit Bewegungsgleichungen führten MC Donald und Whitfield [32] mit einem großen Forscherteam durch. Dafür wurde eine SUBOFF Geometrie verwendet und ein Netz mit ca. 1.400.000 Zellen erstellt. Für den Vortrieb verwendeten Mc Donald und Whitfield ein einfaches Propellermodell und bei einer weiteren Berechnung einen rotierenden Propeller. Für die Berechnung wurden verschieden $k - \epsilon$ Turbulenzmodelle verwendet, wobei auch hier der starke Einfluß auf die Berechnungsergebnisse in Abhängigkeit der Strömung herausgestellt wird. Die unterschiedlichen Strömungszustände, die von laminarer Strömung bis zur turbulenten Strömung reichten, lieferten sehr gute bis mäßige Ergebnisse. Aufgrund des sehr hohen Rechenaufwandes wurden jedoch nur 0.6 Sekunden Simulationszeit mit dem rotierenden Propeller erreicht. Die modellierten Ruder wurden während

der Berechnung nicht bewegt.

Mit der Entwicklung des UnRANS (unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes) Codes UNCLE wurde durch Purtell [35], [40] ein Programmpaket für die US Navy erstellt, welches die Simulation von langsamen Unterseebootmanövern mit Propellereinfluß ermöglicht, ohne große Einschränkungen bei der Komplexität der Geometrie hinnehmen zu müssen. Mit einer Unterseeboot ähnlichen Form wurde durch einen begrenzten Ruderausschlag (10°) am Turmruder ein Auftauchmanöver erfolgreich eingeleitet. Für die Berechnungen im Modellmaßstab verwendete Purtell ein Rechengebiet mit 7,8 Millionen Elementen und für die Berechnung der Großausführung ein Netz mit 10,75 Millionen Zellen. Die Validierung mit Meßergebnissen für schnelle Manöver war noch nicht abgeschlossen. Für die Geradeausfahrt und Manöver mit leichter Lageänderung konnten sehr gute Übereinstimmungen erzielt werden. Bei der Widerstandsprognose zeigte sich, daß das verwendete $k - \omega$ -Turbulenzmodell den Widerstand mit ca. 12% Abweichung berechnet, während das $k - \epsilon$ -Turbulenzmodell Abweichungen von ca. 5% zu den experimentellen Daten lieferte. Erst durch die Parallelisierung des Rechenverfahrens können die instationären Berechnungen unter Berücksichtigung der Viskosität in einem akzeptablen Zeitrahmen durchgeführt werden. So benötigt die von Purtell untersuchte Geometrie auf 50 Prozessoren 4950 CPU-Stunden Rechenzeit pro berechneter Bootslänge. Dies entspricht ca. 100 Stunden Rechenzeit oder 4300 Zeitschritten pro Bootslänge.

Ein weiterer RANS Code für Manövriersimulationen wird derzeit in Frankreich von der Ecole Central Nantes für die französische Marine entwickelt. Jaquin [21] beschreibt in seiner Arbeit den Stand der Entwicklung. Jaquin erläutert, daß bei der Umrechnung von einem stationären Koordinatensystem auf ein mitbewegtes Koordinatensystem die Berücksichtigung der Coriolis- und der Zentrifugalkräfte notwendig ist. Die Diskretisierung erfolgt mit einem Verfahren für Finite-Differenzen zweiter Ordnung und als Turbulenzmodell wird ein $k - \omega$ -Turbulenzmodell nach Wilcox verwendet.

Durch das Nachfahren von Schiffsmanövern in der Simulation von zuvor durchgeführten Experimenten, wurden die Rechenergebnisse validiert, bevor eine Kopplung mit einem System zur Lösung der sechs Bewegungsgleichungen erfolgt. Die Kopplung zwischen Strömungslöser und Bewegungsgleichung wurde sowohl mit impliziten, wie auch mit expliziten Verfahren getestet, und beide Verfahren lieferten akkurate Vorhersagen der Bewegung. Dabei wurde die klassische Euler Methode für die Zeitintegration einer Prediktor

Korrektor Methode gegenübergestellt, wie sie auch bei Xing-Kaeding [14] Anwendung findet. Die Ruderbewegung wird durch Gitterverzerrung realisiert, was Ruderausschläge von ca. 10 Grad zuläßt. Der Propeller wird über ein Body-Force Modell realisiert, welches Schub und Drall simuliert. Die gleichzeitige Einbindung von Propellermodell und Ruderbewegung ist Gegenstand laufender Forschung, um ein freifahrendes Boot realisieren zu können.

2.2 Starrkörper Bewegung

In der vorliegenden Arbeit wird das Bewegungsverhalten von Unterwasserfahrzeugen behandelt. Dabei wird das Boot als Starrkörper betrachtet, so daß sich die Form, die Größe und die Massenverteilung über die Zeit betrachtet, nicht verändert. Die bei einem echten Fahrzeug, aufgrund der Elastizität der beim Bau verwendeten Werkstoffe auftretenden Verformungen, sind im Vergleich zu der beim Manövrieren betrachteten Bewegung vernachlässigbar gering. Die beweglich modellierten Ruder des Bootes werden jeweils in einem eigenen Subsystem, ebenfalls als Starrkörper betrachtet.

Für die Berechnung des Bewegungsverhaltens von Unterseebooten ist es sinnvoll zwei Koordinatensysteme zu verwenden. Zum einen ein erdfestes Koordinatensystem und zum anderen ein sich mit dem Boot mitbewegendes Koordinatensystem. Das erdfeste Koordinatensystem ist ein Rechtssystem mit den Achsen ξ, η, ζ wobei ξ und η in einer horizontalen Ebene liegen und ζ senkrecht dazu nach unten gerichtet ist.

Die Lage des Koordinatenursprungs des bootsfesten Koordinatensystems ist zunächst beliebig wählbar. Für eine einfache Betrachtung der Bewegungsgleichung sind jedoch folgende Punkte zu berücksichtigen. Nahezu alle Wasserfahrzeuge haben mindestens eine Symmetrieebene, die sich meistens in Längsrichtung befindet. Aus diesem Grund sollte eine Achse parallel zur Schiffslängsrichtung liegen und orthogonal zu der Symmetrieebene eine zweite Koordinatenrichtung verlaufen. Um die Bewegungsgleichungen nicht unnötig zu verkomplizieren ist die Wahl eines rechtwinkligen, bootsfesten Koordinatensystems mit einem Ursprung im Gewichtsschwerpunkt des Bootes sinnvoll. Die positive

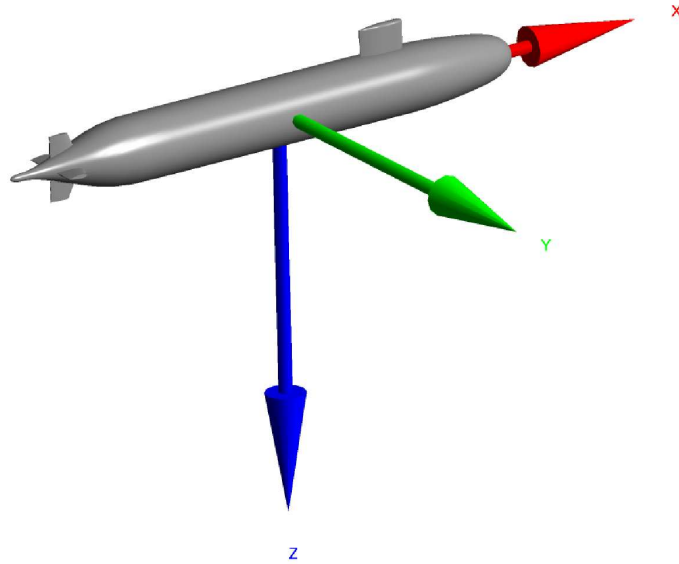


Abbildung 1: Lage des bootsfesten Koordinatensystems

x Achse zeigt in Mittschiffsrichtung nach vorne und liegt in der Symmetrieebene. Die positive y Achse zeigt nach Steuerbord senkrecht zur Symmetrieebene und die positive z Achse zeigt senkrecht zu den anderen Achsen in Richtung des Kiels, Abbildung (1). Die zwei Systeme sind notwendig, da bei der Betrachtung von Bootsmanövern meistens die Berechnung des Bahnverlaufs von Interesse ist, welcher sinnigerweise in einem erdfesten Koordinatensystem angegeben wird, also fest zu dem Gebiet in dem sich das Boot befindet. Dem gegenüber steht die Betrachtung des Bootes mit seiner Geometrie, seiner Masse, den Trägheitskräften und allen anderen Einflüssen, die hinsichtlich des Rechenaufwandes sinnvoller in einem bootsfesten System betrachtet werden.

Zu den einzelnen Achsen x, y und z erfolgt die Zuordnung der Einheitsvektoren \vec{i}, \vec{j} und \vec{k} , so daß sich die drei translatorischen Geschwindigkeiten u, v, w und die drei Winkelgeschwindigkeiten p, q, r folgendermaßen zusammensetzen:

$$\vec{U} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} \quad (2.1)$$

$$\vec{\Omega} = p\vec{i} + q\vec{j} + r\vec{k} \quad (2.2)$$

Der Abstand zwischen dem Ursprung des globalen Koordinatensystems O und dem des lokalen Koordinatensystems o wird ausgedrückt als \vec{R}_O . Für den Vektor gilt:

$$\vec{R}_O = \xi_O \vec{I} + \eta_O \vec{J} + \zeta_O \vec{K} \quad (2.3)$$

Daraus folgt für einen beliebigen Punkt im globalen Koordinatensystem:

$$\vec{R} = \xi \vec{I} + \eta \vec{J} + \zeta \vec{K} \quad (2.4)$$

und für einen beliebigen Punkt im bootsfesten Koordinatensystem:

$$\vec{\rho} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k} \quad (2.5)$$

Die Kräfte und Momente im bootsfesten Koordinatensystem können folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\vec{F} = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k} \quad (2.6)$$

$$\vec{M} = K\vec{i} + M\vec{j} + N\vec{k} \quad (2.7)$$

Während die Lage des Ursprungs o relativ zum globalen Koordinatensystem durch den Vektor \vec{R}_o eindeutig beschrieben wird, wird die Orientierung der Achsen x, y, z relativ zu den Achsen ξ, η, ζ durch die drei Eulerwinkel ϕ, θ, ψ ausgedrückt. Die Transformation erfolgt durch drei aufeinander folgende Rotationen. Dabei wird die Rotation immer um die sich neu ergebenden Achsen ausgeführt. Wenn zu Beginn die Achsen der Koordinatensysteme parallel sind, so ergibt sich die neue Position durch drei Rotationen. Aus der Ausgangslage wird zunächst die Gierbewegung um die z Achse, dann die Stampfbewegung um die neue y Achse und schließlich die Rollbewegung um die dann gültige x Achse

ausgeföhrt.

1. Gieren mit ψ um die z -Achse: $x, y, z \Rightarrow x', y', z$
2. Stampfen mit θ um y' -Achse: $x', y', z \Rightarrow x'', y', z'$
3. Rollen mit ϕ um die x'' -Achse: $x'', y', z' \Rightarrow x'', y'', z''$

Die erdfesten Koordinaten ξ, η, ζ eines Punktes P können mit Hilfe einer Transformationsmatrix $[T]$ aus den bootsfesten Koordinaten x, y und z errechnet werden. Die Koordinatentransformation eines Spaltenvektors $\{\vec{\rho}\}$ in den Vektor $\{\vec{R}\}$ erfolgt durch die Addition der translatorischen mit der rotatorischen Verschiebung:

$$\{\vec{R}(P)\} = \{\vec{R}_0\} + [T] \{\vec{\rho}(P)\} \quad (2.8)$$

mit den Vektoren:

$$\{\vec{\rho}\} = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}; \{\vec{R}\} = \begin{Bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

Dabei ist $[T]$ die Transformationsmatrix, die sich aus der Multiplikation der einzelnen Umformungsmatrizen ergibt [7].

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\phi - \sin\psi\cos\phi & \cos\psi\sin\theta\cos\phi + \sin\psi\sin\phi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\phi + \cos\psi\cos\phi & \sin\psi\sin\theta\cos\phi - \cos\psi\sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Die bisherigen Überlegungen erlauben nun, die zeitliche Ableitung einer vektoriellen Größe zu betrachten. Die zeitliche Änderung eines Punktes durch Rotation führt durch einige Umformungen [6] zu dem Ausdruck:

$$\frac{d\vec{R}}{dt} = \left(\zeta \frac{d\Theta}{dt} - \eta \frac{d\Psi}{dt} \right) \vec{I} + \left(\xi \frac{d\Psi}{dt} - \zeta \frac{d\Phi}{dt} \right) \vec{J} + \left(\eta \frac{d\Phi}{dt} - \xi \frac{d\Theta}{dt} \right) \vec{K} = \vec{\Omega} \times \vec{R} \quad (2.12)$$

Wobei für $\vec{\Omega}$ gilt:

$$\vec{\Omega} = \frac{d\Phi}{dt} \vec{I} + \frac{d\Theta}{dt} \vec{J} + \frac{d\Psi}{dt} \vec{K} \quad (2.13)$$

Somit kann die zeitliche Änderung eines Richtungsvektors im bootsfesten Koordinatensystem $\vec{\rho}(P)$ bestimmt werden und anschließend die zeitliche Ableitung gebildet werden.

$$\vec{\rho}(P) = \vec{R}(P) - \vec{R}_O \quad (2.14)$$

$$\frac{d\vec{\rho}}{dt} = \frac{d\vec{R}}{dt} - \frac{d\vec{R}_O}{dt} = \vec{\Omega} \times \vec{R} - \vec{\Omega} \times \vec{R}_O = \vec{\Omega} \times (\vec{R} - \vec{R}_O) = \vec{\Omega} \times \vec{\rho} \quad (2.15)$$

Die Geschwindigkeit eines beliebigen Punktes im bootsfesten Koordinatensystem kann durch die Superposition der translatorischen Geschwindigkeit des Koordinatenursprungs o und der rotatorischen Geschwindigkeit um eine Achse durch diesen Punkt ausgedrückt werden. Dabei können die Geschwindigkeitskomponenten entweder im bootsfesten oder im raumfesten Koordinatensystem betrachtet werden, die über die Transformationsmatrix $[T]$ in Bezug stehen.

$$\vec{U}(P) = \vec{U} + \vec{\Omega} \times \vec{\rho}(P) \quad (2.16)$$

Für die spätere Betrachtung ist zu beachten, daß die zeitliche Änderung der Eulerwinkel $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ ungleich den Komponenten der Winkelgeschwindigkeiten p, q, r sind. Dies resultiert aus der Tatsache, daß die Eulerwinkel nicht rechtwinkelig aufeinander stehen, sondern sich erst aus der Rotationsfolge ergeben. Aus diesem Grund wird auch die Inverse der Matrix nicht durch Vertauschen der Zeilen und Spalten gebildet [6].

$$\left\{ \vec{\Omega} \right\} = \begin{Bmatrix} p \\ q \\ r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi\cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{Bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\begin{Bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p \\ q \\ r \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

2.3 Bewegungsgleichungen

Für die Betrachtung der Dynamik eines manövrierenden Bootes ist es sinnvoll, den Koordinatenursprung in den Massenschwerpunkt des Bootes zu legen. Dies hat den Vorteil, daß die auf den Körper wirkenden Massenkräfte, Aufgrund der im Schwerpunkt angreifenden Gewichtskraft kein zusätzliches Moment auf den Körper ausüben. Dadurch kann das Newtonsche Gesetz für die Punktmasse direkt auf den Starrkörper übertragen werden [8]. Des weiteren können die Gleichungen für die resultierenden Kräfte und Momente getrennt aufgestellt werden, ohne daß in den Momentengleichungen zusätzliche Momententerme berücksichtigt werden müssen. Um für spätere Anwendungen die nötige Flexibilität des Programmcodes zu wahren, werden im folgenden Kapitel die Bewegungsgleichungen zunächst allgemeingültig formuliert, d.h. mit einem Koordinatenursprung in

einer beliebigen Lage im Boot. Dies kann beispielsweise nützlich sein, wenn die Masse zeitlich variabel ist, was speziell für Unterseeboote relevant sein kann. Während bei Überwasserschiffen die Masse im Verhältnis zur Schiffsmasse, durch den Verbrauch von Kraftstoffen und Lebensmitteln, nur sehr langsam variiert, kann auf Unterseebooten durch das Fluten oder Lenzen von Tauchzellen oder durch den Ausstoß von Effektoren eine erhebliche Massenänderung binnen Sekunden erfolgen [9].

Die Gleichung für eine konstante Masse bei einer gleichförmigen Beschleunigung ergibt sich aus dem Newtonschen Gesetz für ein ruhendes Inertialsystem.

$$\vec{F} = m\dot{\vec{U}} \quad (2.19)$$

Dabei ist \vec{F} die resultierende Kraft der Summe aller äußeren Kräfte. Mit den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Regeln für die Umformung (2.16), kann die Beschleunigung des Ursprungs $\dot{\vec{U}}$ mit der Beschleunigung im bootsfesten Koordinatensystem $\left(\dot{\vec{U}}\right)_{xyz}$ beschrieben werden.

$$\dot{\vec{U}} = \left(\dot{\vec{U}}\right)_{xyz} + \vec{\Omega} \times \vec{U} \quad (2.20)$$

Mit Gleichung (2.20) eingesetzt in (2.19) ergibt sich für die einzelnen Kraftkomponenten

$$\begin{aligned} X &= m(\dot{u} + wq - vr) \\ Y &= m(\dot{v} + ur - wp) \\ Z &= m(\dot{w} + vp - uq) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Dabei sind u, v, w die Geschwindigkeitskomponenten von \vec{U} im bootsfesten Koordinatensystem und $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ sind die dazugehörigen zeitlichen Ableitungen.

Entsprechend der Kräftegleichung, kann auch die Momentengleichung formuliert werden [6].

$$\vec{M}(P) = \dot{\vec{h}}(P) + \vec{U}(P) \times m\vec{U} \quad (2.22)$$

Dabei ist $\vec{M}(P)$ das wirkende Moment um einen Punkt P und $\vec{h}(P)$ ist der Drehimpuls des Körpers um den Punkt P im erdfesten Koordinatensystem. Für einen Punkt im Gewichtsschwerpunkt vereinfacht sich die Gleichung erheblich [6].

$$\vec{M} = \dot{\vec{h}} \quad (2.23)$$

Nach der bereits oben verwendeten Umformung ergibt sich für ein bootsfestes Koordinatensystem dann für das Moment:

$$\vec{M} = \dot{\vec{h}}_{xyz} + \vec{\Omega} \times \vec{h} \quad (2.24)$$

In Gleichung (2.24) ist der Drehimpuls \vec{h} über das Volumenintegral des Körpers definiert. Dabei ist zu beachten, daß $\vec{\rho}$ der Radius im relativ System ist.

$$\vec{h} = \int_{\nabla} \vec{\rho} \times (\vec{\Omega} \times \vec{\rho}) \, dm \quad (2.25)$$

Dieser Ausdruck kann in Komponentenschreibweise im bootsfesten Koordinatensystem formuliert werden. Mit dem ausgeschriebenen Kreuzprodukt ergibt sich für die Komponenten des Drehimpulses:

$$\begin{aligned} h_x &= p \int_{\nabla} (y^2 + z^2) \, dm - q \int_{\nabla} xy \, dm - r \int_{\nabla} xz \, dm \\ h_y &= -p \int_{\nabla} xy \, dm + q \int_{\nabla} (z^2 + x^2) \, dm - r \int_{\nabla} yz \, dm \\ h_z &= -p \int_{\nabla} xz \, dm - q \int_{\nabla} yz \, dm + r \int_{\nabla} (x^2 + y^2) \, dm \end{aligned} \quad (2.26)$$

Anders ausgedrückt, ergibt sich der Drehimpuls aus dem Produkt von Trägheitsmatrix und Winkelgeschwindigkeit [6].

$$\{h\} = [\bar{I}]\{\Omega\} \quad (2.27)$$

mit

$$\begin{aligned}
 [\bar{I}] &= \begin{bmatrix} \int_{\nabla} (y^2 + z^2) dm & -\int_{\nabla} xy dm & -\int_{\nabla} xz dm \\ -\int_{\nabla} xy dm & \int_{\nabla} (z^2 + x^2) dm & -\int_{\nabla} yz dm \\ -\int_{\nabla} xz dm & -\int_{\nabla} yz dm & \int_{\nabla} (x^2 + y^2) dm \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \bar{I}_{xx} & -\bar{I}_{xy} & -\bar{I}_{xz} \\ -\bar{I}_{xy} & \bar{I}_{yy} & -\bar{I}_{yz} \\ -\bar{I}_{xz} & -\bar{I}_{yz} & \bar{I}_{zz} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

Dabei bedeutet der Balken, daß die Trägheitsmomente auf einen Koordinatenursprung im Massenschwerpunkt bezogen sind und der Ausdruck nur für diese Annahme Gültigkeit besitzt.

Mit Gleichung (2.24) führen diese Ergebnisse zur Gleichung für das Drehmoment im bootsfesten Koordinatensystem.

$$\begin{aligned}
 \vec{M} &= (\bar{I}_{xx}\dot{p} - \bar{I}_{xy}\dot{q} - \bar{I}_{xz}\dot{r})\vec{i} + (-\bar{I}_{yx}\dot{p} + \bar{I}_{yy}\dot{q} - \bar{I}_{yz}\dot{r})\vec{j} + (-\bar{I}_{zx}\dot{p} - \bar{I}_{zy}\dot{q} + \bar{I}_{zz}\dot{r})\vec{k} \\
 &+ \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ p & q & r \\ h_x & h_y & h_z \end{vmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

Wie die auf einen Körper wirkende Kraft \vec{F} mit den Komponenten entlang der Achsen x, y und z definiert ist als:

$$\vec{F} = \vec{i}X + \vec{j}Y + \vec{k}Z \tag{2.30}$$

So ist auch das Moment \vec{M} welches auf den Körper wirkt in den Komponenten entlang der x, y und z Richtung definiert:

$$\vec{M} = \vec{i}K + \vec{j}L + \vec{k}M \tag{2.31}$$

Um die bisher hergeleiteten Größen nicht nur auf den Massenschwerpunkt zu beziehen, sondern auf einen beliebig gewählten Punkt, muß ein Term für die Beschleunigung des

Gewichtsschwerpunktes relativ zu dem gewählten Punkt eingefügt werden. Im bootsfesten System wird der Abstand durch $\vec{\rho}_G$ definiert. Mit dem zusätzlichen Term verändert sich Gleichung (2.20) zu:

$$\dot{\vec{U}}_G = \left(\dot{\vec{U}} \right)_{xyz} + \vec{\Omega} \times \vec{U} + \dot{\vec{\Omega}} \times \vec{\rho}_G + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{\rho}_G) \quad (2.32)$$

Durch Substitution von Gleichung (2.19) ergibt sich aus Gleichung (2.32) in Komponentenschreibweise für die drei Kraftkomponenten

$$\begin{aligned} X &= m[\dot{u} + wq - vr - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \\ Y &= m[\dot{v} + ur - wp - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] \\ Z &= m[\dot{w} + vp - uq - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] \end{aligned} \quad (2.33)$$

dabei geben x_G, y_G, z_G die Lage des Gewichtsschwerpunktes im bootsfesten Koordinatensystem an.

Aus der Momentengleichung (2.24) ergibt sich nach dem oben beschriebenen Prinzip Gleichung (2.32). Durch die Erweiterung um das Moment, welches sich durch die wirkende Kraft im Gewichtsschwerpunkt ergibt, kann Gleichung (2.35) aufgestellt werden.

$$\vec{M} = \vec{M}_G + \rho_G \times \vec{F} \quad (2.34)$$

$$\vec{M} = (\dot{h}_{xyz} + \vec{\Omega} \times \vec{h})_G + \rho_G \times \vec{F} \quad (2.35)$$

Die für das Moment um den Schwerpunkt aufgestellte Gleichung (2.29) kann für ein beliebig orientiertes Koordinatensystem erweitert werden [6]. Dafür ist eine Parallelverschiebung der Koordinatenachsen zur Bestimmung der Trägheitsterme, wie hier beispielhaft gezeigt, notwendig.

$$\bar{I}_{xx} = I_{xx} - m(y_G^2 + z_G^2); \bar{I}_{xy} = I_{xy} + mx_Gy_G \quad (2.36)$$

In Komponentenschreibweise entstehen aus Gleichung (2.35) durch das Ausmultiplizieren des Kreuzproduktes und das Einsetzen der Kraftterme aus Gleichung (2.33) die

Momentengleichungen.

$$\begin{aligned}
K &= I_{xx}\dot{p} + I_{xy}(\dot{q} - pr) + I_{xz}(\dot{r} + pq) + I_{yz}(q^2 - r^2) + (I_{zz} - I_{yy})qr \\
&\quad + m[y_G(\dot{w} + vp - uq) - z_G(\dot{v} + ur - wp)] \\
M &= I_{yy}\dot{q} + I_{yz}(\dot{r} - qp) + I_{yx}(\dot{p} + qr) + I_{zx}(r^2 - p^2) + (I_{xx} - I_{zz})rp \\
&\quad + m[z_G(\dot{u} + wq - rv) - x_G(\dot{w} + vp - uq)] \\
N &= I_{zz}\dot{r} + I_{zx}(\dot{p} - rq) + I_{zy}(\dot{q} + rp) + I_{xy}(p^2 - q^2) + (I_{yy} - I_{xx})pq \\
&\quad + m[x_G(\dot{v} + ur - wp) - y_G(\dot{u} + wq - rv)]
\end{aligned} \tag{2.37}$$

Die Gleichungen (2.33) und (2.37) bilden die Kraft- und Momentengleichungen um alle drei Achsen in einem bootsfesten Koordinatensystem in allgemeiner Form. Mit diesen Gleichungen und den oben beschriebenen Umrechnungen können die Bewegungsgleichungen aufgestellt werden.

In einem idealen Fluid erfährt ein tiefgetauchter Körper bei konstanter Geschwindigkeit, nach dem d' Alembertschen Paradoxon, keinen Widerstand. Sobald dieser Körper jedoch eine Beschleunigung erfährt, wirkt dieser Beschleunigung proportional entgegengerichtet eine hydrodynamische "Kraft". Diese "Kraft" ist nötig, um das den Körper umgebende Fluid mit zu beschleunigen und wird oft als "hydrodynamische Masse" bezeichnet. Die "hydrodynamische Masse" A_{ij} (added Mass) ergibt sich aus dem Quotienten der Kraft oder des Moments in Richtung i und einer Beschleunigung in Richtung j . Die Indizes laufen von 1 bis 6 entsprechend den sechs Bootsbewegungen. Die hydrodynamischen Massen für die drei translatorischen Bewegungen schnellen, versetzen und tauchen (1-3), sowie für die drei rotatorischen Bewegungen rollen, stampfen und gieren (4-6) werden entsprechend definiert. Somit ergibt sich beispielsweise für die hydrodynamische Masse in vertikaler Richtung als Resultat einer Vorausbewegung:

$$A_{31} = -\frac{Z}{\xi} \tag{2.38}$$

Da die "hydrodynamische Masse" entgegen der Beschleunigungsrichtung wirkt, ergibt sich ein negatives Vorzeichen. Als Einheiten für A_{ij} ergibt sich für die translatorischen

Bewegungen (1-3) eine Masse und für die rotatorischen Bewegungen (4-6) ein Trägheitsmoment. Für die übrigen Kombinationen ergibt sich ein Produkt aus Masse und Länge. Bei Unterwasserkörpern mit einer Symmetrie längs der Mittschiffsachse bildet sich durch eine vertikale Tauch- oder Stampfbewegung ein symmetrisches Strömungsfeld in vertikaler Richtung um den Körper aus. Dadurch bildet sich ebenfalls ein symmetrisches Druckfeld aus, so daß sich die horizontalen Kräfte ausgleichen. Somit induziert eine vertikale Bewegung eines symmetrischen Körpers keine horizontalen Kräfte, wodurch diese Elemente der Matrix $[A]$ zu 0 gesetzt werden können [6].

$$A_{32} = A_{34} = A_{36} = A_{52} = A_{54} = A_{56} = 0 \quad (2.39)$$

$$(2.40)$$

Das Gleiche trifft für eine Bewegung in Längsrichtung zu, wodurch weitere Elemente der Matrix $[A]$ wegfallen können.

$$A_{12} = A_{14} = A_{16} = 0 \quad (2.41)$$

$$(2.42)$$

In potentialtheoretischen Methoden wird der Einfluß der beschleunigungsabhängigen Fluidkräfte als mitbeschleunigte hydrodynamische Masse betrachtet. In der vorliegenden Arbeit wurde die hydrodynamische Massenmatrix $[A]$ für die verwendeten Geometrien als bekannt vorausgesetzt. Sie wird vom Projektpartner bereitgestellt. Diese Daten basieren auf Mess- und Berechnungsmethoden nach Bohlmann [11].

Bei expliziten Kopplungsverfahren kann die Abhängigkeit der Fluidkräfte von der Beschleunigung zu numerischen Divergenzen führen. Um die numerische Berechnung zu stabilisieren, wird häufig die hydrodynamische Masse in den Bewegungsgleichungen berücksichtigt [7], [14]. Diese kann zu einer starken Dämpfung der berechneten Bewegungen führen und damit zu fehlerhaften Ergebnissen.

Die oben aufgestellten Bewegungsgleichungen (2.33), (2.37) enthalten 18 Unbekannte. Dies sind jeweils die sechs Unbekannten für die Geschwindigkeit, die Beschleunigung

und die Position. Das bedeutet, daß weitere zwölf Gleichungen zur Lösung des Gleichungssystems notwendig sind. Die fehlenden Gleichungen ergeben sich durch die einfache Integration des Ortes nach der Zeit und der Geschwindigkeit nach der Zeit. Somit sind die fehlenden Gleichungen:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}; \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{pmatrix} \\ \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Phi \\ \Theta \\ \Psi \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & \sin\Phi \tan\Theta & \cos\Phi \tan\Theta \\ 0 & \cos\Phi & -\sin\Phi \\ 0 & \sin\Phi/\cos\Theta & \cos\Phi/\cos\Theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix}; \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.43)$$

Die Eulerwinkel ϕ, θ und ψ in den hier genannten Gleichungen geben die Orientierung des bootsfesten Koordinatensystems an. Die Beziehung zwischen der Änderung der Eulerwinkel und den Komponenten der Winkelgeschwindigkeit p, q und r wird durch folgende Gleichung beschrieben (2.44). Die gebräuchlichste Lösung besteht darin, die Gleichungen in ein gekoppeltes Gleichungssystem mit den sechs Beschleunigungstermen umzuformen:

$$\vec{F} = ([M] + [A])\vec{a} \quad (2.44)$$

Dabei steht \vec{F} für die angreifende Kraft bei den Komponenten 1-3 und für das angreifende Momente in den Komponenten 4-6. Die Massen- und Trägheitsterme sind in der Massenmatrix $[M]$ zusammengefasst und $[A]$ steht für die MAtrix der hydrodynamischen Massen (2.45).

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Die Beschleunigungsterme sind in Vektor \vec{a} zusammengefasst. Die einzelnen Komponenten der Kraftterme setzen sich folgendermaßen zusammen:

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{pmatrix} \quad (2.46)$$

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} \quad (2.47)$$

Dadurch lassen sich die Beschleunigungsterme folgendermaßen bestimmen:

$$\vec{a} = ([M] + [A])^{-1} \vec{F} \quad (2.48)$$

Durch zweifache Integration der Beschleunigung über die Zeit wird der Verschiebeweg ermittelt. Da jedoch der Verschiebeweg im globalen Koordinatensystem gesucht wird,

erfolgt zwischen der ersten und zweiten Integration eine Koordinatentransformation.

$$\frac{d}{dt}\vec{u} = \vec{a} = [M + A]^{-1}\vec{F} \quad (2.49)$$

$$\dot{\vec{\xi}} = [T]\vec{u} \quad (2.50)$$

$$\frac{d}{dt}\vec{\xi} = \dot{\vec{\xi}} \quad (2.51)$$

Dabei ist $[T]$ die Transformationsmatrix. Für $\dot{\vec{\xi}}$ gilt:

$$\dot{\vec{\xi}} = \left(\dot{\xi}, \dot{\eta}, \dot{\zeta}, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi} \right)^T \quad (2.52)$$

Für die Approximation von \vec{u} und $\vec{\xi}$ wird das Mehrschrittverfahren von Runge-Kutta favorisiert, da dieses eine stabile und ausreichend exakte Approximation liefern kann [12].

2.4 Strömungsberechnung

Für die Strömungsberechnungen in der vorliegenden Arbeit wurde das Berechnungsprogramm CFX der Firma Ansys verwendet. Das Rechenverfahren löst die für das zu behandelnde Problem notwendigen Reynoldsgemittelten Navier-Stokes-Gleichungen bei vorgegebenen Randbedingungen. In der vorliegenden Arbeit werden die Gleichungen zur Beschreibung der Impuls- und Massenerhaltung berücksichtigt. Dabei handelt es sich um partielle nichtlineare Differentialgleichungen, die numerisch gelöst werden können.

Bei den verschiedenen Lösungsverfahren für CFD Berechnungen, hat sich die Methode der Finiten-Volumen bewährt. Bei dieser Methode wird das zu betrachtende Rechenggebiet in viele kleine Rechengebiete unterteilt, welche als Kontrollvolumen Ω bezeichnet werden. Die Integralform der zu lösenden Gleichungen für jedes Kontrollvolumen wird diskretisiert und in ein lineares Gleichungssystem überführt, das iterativ gelöst wird. Das Ergebnis ist für jeden Gitterpunkt im Rechenggebiet eine angenäherte Lösung jeder einzelnen Variablen. Die Ergebnisse dieses Verfahrens bilden für das gesamte Rechenggebiet

das Strömungsverhalten ab.

Nach dem Reynoldsschen Transporttheorem können die Gleichungen für die Massen- und Impulserhaltung in Integralform formuliert werden [13], wobei Ω das Kontrollvolumen und ρ die Dichte darstellt.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (2.53)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega + \int_S \rho \cdot \vec{v} \vec{v} \cdot \vec{n} dS = \int_S (T - pI) \cdot \vec{n} dS + \int_{\Omega} \rho \vec{b} d\Omega \quad (2.54)$$

Dabei gibt p den Druck auf ein Flächenelement dS an und der viskose Spannungstensor T dient zur Ermittlung der Scherkräfte am Kontrollvolumen, I ist der Einheitstensor und \vec{b} steht für den Beschleunigungsvektor.

Zur Lösung verschiedener Probleme in der Fluidodynamik ist die Verwendung von bewegten Rechengittern von Vorteil. Dafür werden die Gleichungen (2.53), (2.54) erweitert, um den Beitrag der Gitterbewegung zu berücksichtigen. In integraler Form können die Erhaltungsgleichungen des stationären Rechengitters durch den Beitrag der Gittergeschwindigkeit angepaßt werden. Deshalb wird bei bewegten Gittern in den Erhaltungsgleichungen der Durchfluß an den Oberflächen eines Kontrollvolumens nicht mit den Absolutgeschwindigkeiten, sondern mit den Relativgeschwindigkeiten gebildet (2.55), (2.56). Der Anteil der Diffusion und der Quellterme wird durch die Bewegung des Kontrollvolumens nicht verändert.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho (\vec{v} - \vec{v}_b) \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (2.55)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega + \int_S \rho (\vec{v} - \vec{v}_b) \vec{v} \cdot \vec{n} dS = \int_{\Omega} (T - pI) \cdot \vec{n} dS + \int_{\Omega} \rho \vec{b} d\Omega \quad (2.56)$$

In den hier abgebildeten Gleichungen ist \vec{v}_b die Geschwindigkeit, mit der sich der Rand

des Kontrollvolumens bewegt. Für die Strömung im Außenbereich des Rechengebiet, wo die Geschwindigkeit \vec{v}_b , mit der sich das Kontrollvolumen durch das Fluid bewegt, gleich der Einströmgeschwindigkeit \vec{v} ist, hebt sich dieser Term auf, so daß die Lösung eine ungestörte Strömung ist. Die oben genannten Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls werden bei bewegten Gittern durch eine Erhaltungsgleichung für den Raum ergänzt. Diese wird ausgedrückt über die Beziehung zwischen der zeitlichen Änderung des Kontrollvolumens Ω und der Gittergeschwindigkeit der Begrenzungsflächen S [13], falls eine Gitterverzerrung auftritt (2.57).

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} d\Omega - \int_S \vec{v}_b \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (2.57)$$

Bei einem Kontrollvolumen, das die Form und die Position über der Zeit ändert, kann die Differenz zwischen den Volumina als Summe der einzelnen Teilvolumina dargestellt werden (2.58). Durch die Verwendung eines starren Rechengitters ist die zeitliche Volumenänderung der Kontrollvolumina gleich Null, so daß dieser Term entfällt.

$$\frac{(\Delta\Omega)^{n+1} - (\Delta\Omega)^n}{\Delta t} = \frac{\sum_c \delta\Omega_c}{\Delta t} \quad (2.58)$$

Durch die Integration über der Zeit ergibt sich der Volumenfluß $\dot{\Omega}_c$ durch die Seite c infolge der Bewegung der Seite. Bei großen Zeitschritten und wenn alle Kontrollvolumenseiten sich in verschiedene Richtungen bewegen, können künstliche Massenquellen auftreten und die Rechenergebnisse verfälschen. Zur Vermeidung derartiger Effekte bei der Berechnung der Volumenflüsse durch die Kontrollvolumina muß die nachfolgende Gleichung (2.59) berücksichtigt werden [?]:

$$\dot{\Omega}_c = (\vec{v}_b \cdot \vec{n})_c S_c = \frac{\delta\Omega_c}{\Delta t} \quad (2.59)$$

Neben der Massen- und Impulserhaltung kann für andere Zustandsgrößen die allgemeine

Erhaltungsgleichung für skalare Größen aufgestellt werden, die ebenfalls mit den Differenzen der Geschwindigkeiten gebildet wird.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \phi d\Omega + \int_S \rho \phi (\vec{v} - \vec{v}_b) \cdot \vec{n} dS = \int_S \Gamma \nabla \phi \cdot \vec{n} dS + \int_{\Omega} q_{\phi} d\Omega \quad (2.60)$$

Dabei stellt Γ die Diffusität der Skalarengroße ϕ dar, die verschiedene Werte von 1 (Massenerhaltung) über \vec{v} (Impulserhaltung) bis hin zu Werten für die Turbulenz annehmen kann.

Die vorgestellte Navier-Stokes-Gleichung (2.60) ist sowohl zur Berechnung laminarer als auch turbulenter Strömungen geeignet. Jedoch stellt die Berechnung turbulenter Strömungen unter Verwendung der Navier-Stokes-Gleichung immer noch einen erheblichen Rechenaufwand dar. Daher ist die DNS (Direkte Numerische Simulation) von turbulenten Strömungen auf Forschungsanwendungen mit kleinen Abmessungen und niedrigen Reynoldszahlen begrenzt, da hierbei jeder Wirbel durch mehrere Kontrollvolumen des Rechengitters abgebildet werden muß. Der für technische Probleme erforderliche Rechenaufwand ist bei DNS Rechnungen noch nicht zu bewältigen.

Da weder die Anforderungen an die zeitliche noch die räumliche Diskretisierung für praktische Anwendungen realisierbar sind, werden für die Berechnung turbulenter Strömung Turbulenzmodelle verwendet.

Dies erfordert die Verwendung einer modifizierten Form der Navier-Stokes-Gleichung, welche als RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)- Gleichung bezeichnet wird. Diese unterscheidet sich darin, daß in den Erhaltungsgleichungen (2.55), (2.56) die zu lösenden Variablen durch eine zeitlich gemittelte Variable und eine Schwankungsgröße ersetzt werden, welche per Definition stets gleich Null ist. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine praktikable Berechnung der turbulenten Strömung. Für die gemittelte Geschwindigkeit

\bar{u} und die Schwankungsgröße \bar{u}' gilt dann:

$$\vec{u} = \bar{\vec{u}} + \vec{u}' \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned} \bar{\vec{u}} &= \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \vec{u} dt \\ \bar{\vec{u}}' &= \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \vec{u}' dt = 0 \end{aligned} \quad (2.62)$$

oder für eine skalare Größe:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.63)$$

wobei Δt groß gegenüber der typischen Fluktuationszeit, aber klein gegenüber einer typischen Strömungszeit gemittelten Größe ist. Die Erhaltungsgleichungen werden entsprechend zeitlich gemittelt. Die nichtlinearen Terme ergeben dabei:

$$-\rho \overline{\vec{u}\phi} = -\rho \overline{(\bar{\vec{u}} + \vec{u}')(\bar{\phi} + \phi')} = \rho \overline{\bar{\vec{u}}\phi} - \rho \overline{\vec{u}'\phi'} \quad (2.64)$$

$$-\rho \overline{\vec{u}\vec{u}} = -\rho \overline{(\bar{\vec{u}} + \vec{u}')(\bar{\vec{u}} + \vec{u}')} = -\rho \overline{\bar{\vec{u}}\bar{\vec{u}}} - \rho \overline{\vec{u}'\vec{u}'} \quad (2.65)$$

Der letzte Term der Gleichung 2.65 sind neue Unbekannte, die Reynoldsschen Spannungen, die nicht mit den oben genannten Gleichungen bestimmt werden können, sondern mit Hilfe eines Turbulenzmodells genähert werden. [14]. Das verwendete Wirbelviskositätsmodell (eddy viscosity model) geht davon aus, daß kleine Wirbel ständig in Bewegung sind und sich mit der Zeit durch innere Reibung auflösen (Dissipation). Für die wirkenden Scherspannungen wird eine Abhängigkeit vom gemittelten Geschwindigkeitsgradienten angenommen. Das Wirbelviskositätsmodell bildet die molekulare Viskosität des Fluids nach. Die Erhöhung der Viskosität durch turbulente Schwankungen wird als Wirbelviskosität μ_t bezeichnet.

$$\mu_t = \rho \nu_t \quad (2.66)$$

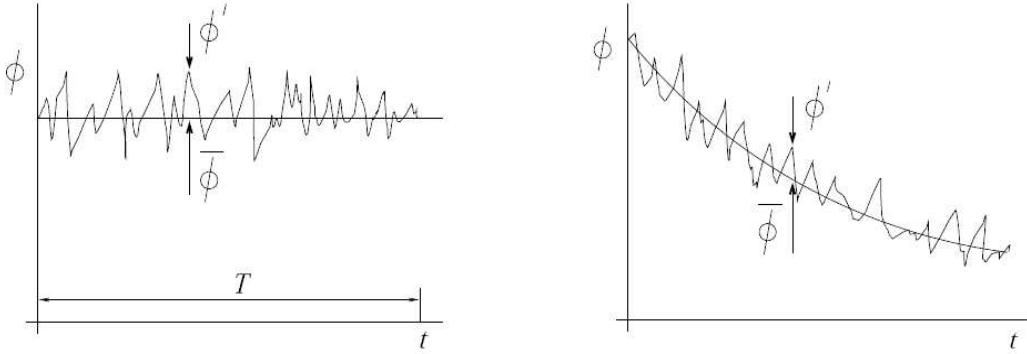


Abbildung 2: Mittelwert und Fluktuation turbulenter Strömungen [41]

Die turbulente Wirbelviskosität μ_t ist proportional zum Produkt aus einem turbulenten Längenmaß L_t und einer turbulenten Geschwindigkeit U_t .

$$\nu_t \sim L_t U_t \quad (2.67)$$

Die einzelnen Modelle werden nach der Anzahl der unabhängigen Variablen, die zur Berechnung von L_t und U_t notwendig sind unterschieden.

Für die Wirbelviskosität wird eine Abhängigkeit vom Gradienten der Diffusion gebildet. Daraus folgt für den skalaren Term:

$$-\rho \overline{u'_i \phi'} = \Gamma_t \frac{d\bar{\phi}}{dx_i} \quad (2.68)$$

Dabei ist Γ_t die turbulente Diffusität und kann durch die turbulente Viskosität μ_t und die Prandtlzahl Pr_t ausgedrückt werden [15].

$$\Gamma_t = \frac{\mu_t}{Pr_t} \quad (2.69)$$

Für die Reynoldsspannungen $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ ergibt sich folgende Gleichung:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{d\bar{u}_i}{dx_j} + \frac{d\bar{u}_j}{dx_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \quad (2.70)$$

Dabei steht in Gleichung (2.70) k für die kinetische Energie der Turbulenz, δ_{ij} für das Kroneckerdelta und μ_t für die Wirbelviskosität. Für die Berechnung turbulenter Strö-

mung wird die dynamische Viskosität in der Impulsgleichung durch eine effektive Viskosität μ_{eff} ersetzt.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases}$$
$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (2.71)$$

Durch die ständige Weiterentwicklung der Verfahren für Strömungsberechnung und deren Nutzung in verschiedenen Anwendungsfällen sind viele unterschiedliche Turbulenzmodelle entwickelt worden. Das einfachste Turbulenzmodell ist das sogenannte Nullgleichungsmodell, da keine weitere Transportgleichung zur Lösung der turbulenten Strömung verwendet wird. Weiter entwickelte Modelle lösen eine bestimmte Zahl von Transportgleichungen wie z.B. die Zweigleichungsmodelle. Die gebräuchlichsten Zweigleichungsmodelle sind sogenannte $k - \epsilon$ und $k - \omega$ Modelle. Dabei werden für die turbulente, kinetische Energie k und für die Dissipation ϵ oder für die Frequenz ω weitere Annahmen in Abhängigkeit der Strömung getroffen. Für komplexe Geometrien mit rotierenden Elementen hat sich das SST-Modell nach Menter bewährt, welches bei den hier vorgestellten Berechnungen verwendet wurde. Dieses stellt eine Kombination aus $k - \epsilon$ und $k - \omega$ dar, wobei der Wechsel der Turbulenzmodelle in Abhängigkeit des Wandabstandes erfolgt.

2.5 Kopplung von Strömungs- und Bewegungsgleichung

Um die Wechselwirkung zwischen der Strömungsberechnung auf der einen Seite und der Starrkörperbewegung auf der anderen Seite zu berechnen, ist eine Kopplung der Berechnungsmethoden notwendig. Da eine Verschiebung der Geometrie in jedem Zeitschritt auch für jeden Zeitschritt das Strömungsgebiet ändert, muß das Strömungsgebiet ständig aktualisiert werden. Die Änderungen der Position der Bootsgeometrie oder die Ruderbewegung ergeben für jeden Zeitschritt neue Randbedingungen für die Strömungsberechnung. Daraus resultieren zeitlich veränderliche Kraft- und Druckterme, die auf die Bootsgeometrie wirken. Am Ende eines jeden Zeitschrittes des Strömungslösers, werden die für die Bewegungsgleichung notwendigen Zustandsgrößen ermittelt und aus der laufenden Strömungsberechnung den Bewegungsgleichungen bereitgestellt.

Durch zweifache Integration über die Zeit kann mit den oben bereits vorgestellten Verfahren aus den Kraft- und Momentengleichungen die Verschiebung für jeden Zeitschritt berechnet werden. Für kleine Zeitschritte eignet sich dafür die Integration nach Euler.

$$\{\vec{u}\}_{n+1} = \{\vec{u}\}_n + ([M] + [A])^{-1} \{\vec{F}_n\} \Delta t \quad (2.72)$$

$$\{\vec{\xi}\}_{n+1} = \{\vec{\xi}\}_n + [T] \{\vec{u}\}_n \Delta t \quad (2.73)$$

Andere Integrationsverfahren sind sogenannte Mehrschrittverfahren. Dabei wird die Ableitung der Funktion am Startpunkt verwendet, um einen Punkt zwischen den Intervallschritten zu bestimmen, Abbildung (3). Mit dem ermittelten Steigungswert an dem Zwischenpunkt wird in einem weiteren Schritt die Steigung für die gesamte Schrittweite des Intervalls berechnet.

Ein weiteres Mehrschrittverfahren ist das Verfahren nach Runge-Kutta, Abbildung (4). Dabei wird das Ergebnis für einen Zeitschritt über eine iterative Integration mit mehreren Zwischenschritten durchgeführt. Mit der Ableitung des Ausgangspunktes wird ein Hilfspunkt ermittelt. An diesem Punkt wird erneut die Ableitung gebildet. Mit der neuen Steigung kann eine weitere Stützstelle ermittelt werden, mit der die Interpolation für das ganze Intervall berechnet werden kann. Der Vorteil des Verfahrens nach Runge-Kutta ist, daß bei gleichbleibender Fehlergröße mit größeren Zeitschritten als beim Verfahren nach Euler gerechnet werden kann.

Für die Berechnung der Gitterverschiebung sind besonders im Ruderbereich sehr kleine Zeitschrittweiten erforderlich. Falls die Verschiebung pro Zeitschritt größer ist als die Ausdehnung einer Gitterzelle, können von der Mesh-Morphing Funktion nicht mehr die korrekten Nachbarzellen bestimmt werden, so daß Gitterüberlappungen entstehen können. Die notwendige kleine Zeitschrittweite ermöglicht für die Kopplung der Strömungs- und Bewegungsgleichungen ein explizites Kopplungsverfahren. Somit erfolgt die Übergabe der Ergebnisse der Strömungssimulation am Ende eines jeden Zeitschrittes und die berechnete Verschiebung wird zu Beginn eines jeden Zeitschrittes ausgeführt, Abbildung (5).

Bei der Berechnung mit größeren Zeitschritten ist die Verwendung eines impliziten Verfahrens zu bevorzugen, bei dem der Austausch der Daten zwischen dem Gleichungslöser der Strömungsgleichungen und dem Lösen der Bewegungsgleichungen zwischen jedem Iterationsschritt erfolgt. Bei ausreichend kleinen Zeitschrittgrößen führen beide Verfah-

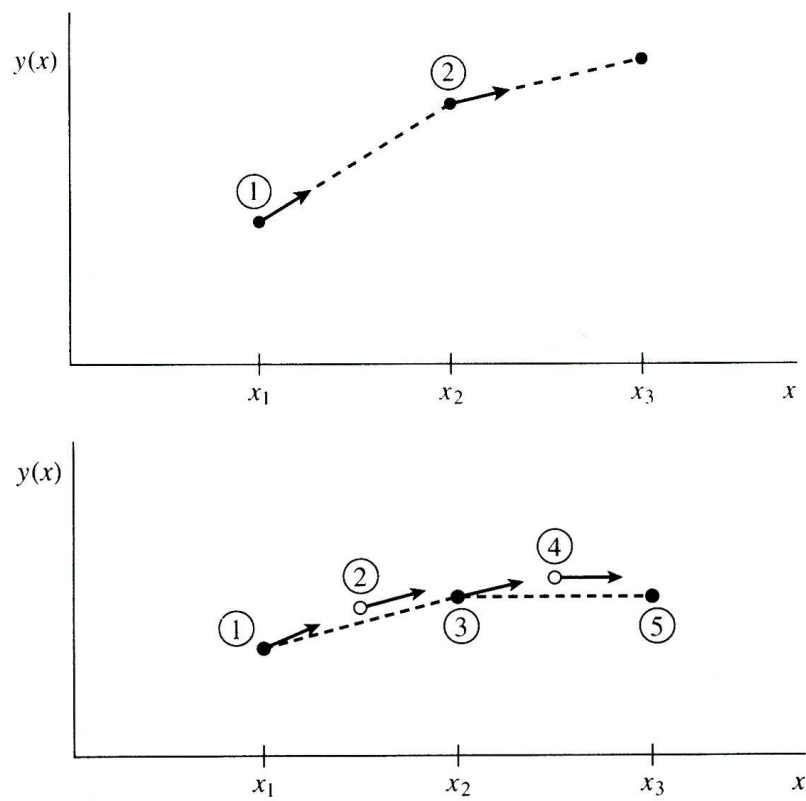


Abbildung 3: Integrationsverfahren; Einschrittverfahren nach Euler (oben), und Mehrschrittverfahren (unten) [12]

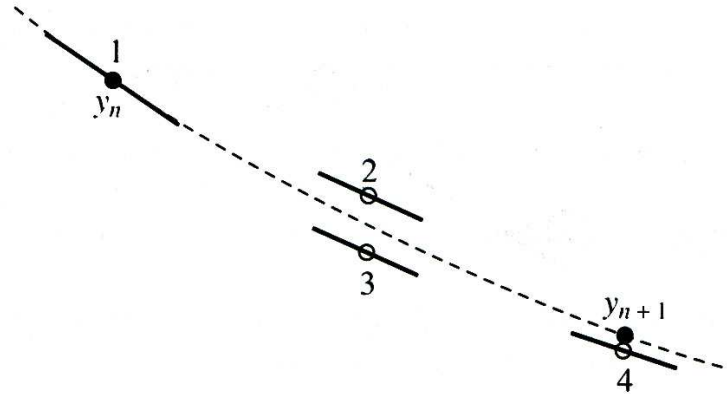


Abbildung 4: Integrationsverfahren; Mehrschrittverfahren nach Runge-Kutta 4.Ordnung [12]

ren zu Lösungen mit vergleichbarer Genauigkeit [21]. Für die Berechnung der Beschleunigungsgrößen nach jedem Zeitschritt fließen in das Runge-Kutta Verfahren die verfügbaren zeitlich variablen Größen aus der Massen- und Trägheitsberechnung, ein.

Nach Abschluß der Berechnung für die Verschiebungsdaten des nächsten Zeitschrittes, werden diese in das Memory-Management System des Gleichungslösers geschrieben, um anschließend die berechnete Verschiebung iterativ auszuführen.

Die in jedem Zeitschritt berechnete Beschleunigung für das Boot hat zusätzlich Auswirkungen auf das, das Boot umgebende mitbeschleunigte Fluid. Dieser Effekt wird durch die Einführung einer hydrodynamischen Masse A in den Bewegungsgleichungen berücksichtigt. Dabei wirkt die hydrodynamische Masse bei der Berechnung der Beschleunigung dämpfend. Diese Unterrelaxaktion der Beschleunigung wirkt stabilisierend auf die numerische Berechnung und kann bei explizit gekoppelten Verfahren nicht durch eine Verringerung der Zeitschrittgröße ersetzt werden, da die Beschleunigung von der Größe des Zeitschritts unabhängig ist. Bei impliziten Verfahren ist die Unterrelaxaktion theoretisch keine Notwendigkeit, wird aber zur Stabilisierung der Berechnungen und zur Verbesserung des Konvergenzverhaltens verwendet [14].

Jeder instationäre Programmablauf beginnt mit dem Bereitstellen der Startwerte für die Variablen zum Zeitpunkt $t = t_0$ sowohl für die Strömungsberechnung als auch für die

Bewegungsgleichungen. Dazu zählen die Randbedingungen und Anfangsgeschwindigkeiten im Strömungsgebiet und die Festlegung der Zeitschrittweiten, aber auch die Massen und Trägheitskräfte für die zu untersuchende Bootsgeometrie. Für die Randbedingungen werden verschiedene Größen wie beispielsweise der Druck p , die Geschwindigkeitsvektoren im Strömungsgebiet \vec{v} , das Turbulenzmodell und das Näherungsverfahren festgelegt. Je genauer die Startwerte gewählt werden, desto schneller konvergieren die Lösungen der Strömungsberechnung.

Für die Lösung der Bewegungsgleichungen werden zu Beginn die Matrizen $[M]$ und $[A]$, wie auch die Bootsgeschwindigkeiten \vec{U} vorgegeben. Die Daten für die Ruderausschläge werden ebenfalls vor der Lösung des ersten Zeitschrittes für den Berechnungszeitraum in das Memory-Management System geladen.

Nachdem sich die Strömung im Rechengebiet mit den Startwerten durch Vorgabe einer festen Anzahl an Zeitschritten ausgebildet hat, beginnt die eigentliche Kopplung zwischen Bewegungsgleichung und Strömungsberechnung. Durch das wechselseitige Aufrufen und Iterieren der Strömungs- und Bewegungsgleichungen läuft die Berechnung bis zum Erreichen der vorgegebenen Simulationszeit durch. Dabei sollte die Zeitschrittweite genügend klein gewählt sein, so daß die Lösungen in jedem Zeitschritt den Konvergenzkriterien für Massen- und Impulserhaltung genügt.

Die vom Gleichungslöser in jedem Zeitschritt berechneten Variablen werden im Memory-Management System (MMS) des Programmpaketes verwaltet. Um diese Werte für externe Berechnungsprogramme zu verwenden, wird mit Hilfe einer Kopplungsroutine (Couple 6 DOF) auf die aktuellen Datensätze zugegriffen und die für die Bewegungsgleichung relevanten Kraft- und Drehmomentenwerte in einer GOUT Datei der User Fortran Routine zu Verfügung gestellt. Die Ergebnisse der Bewegungsgleichung werden wiederum der Kopplungsroutine über eine GIN Datei mitgeteilt. Die für die Gitterbewegung relevanten Daten werden im MMS abgelegt. Die eingebundene User Function berechnet mit den bereitgestellten Werten für jeden Gitterpunkt in den relevanten Domains die Verschiebung für den aktuellen Zeitschritt, Abbildung(6).

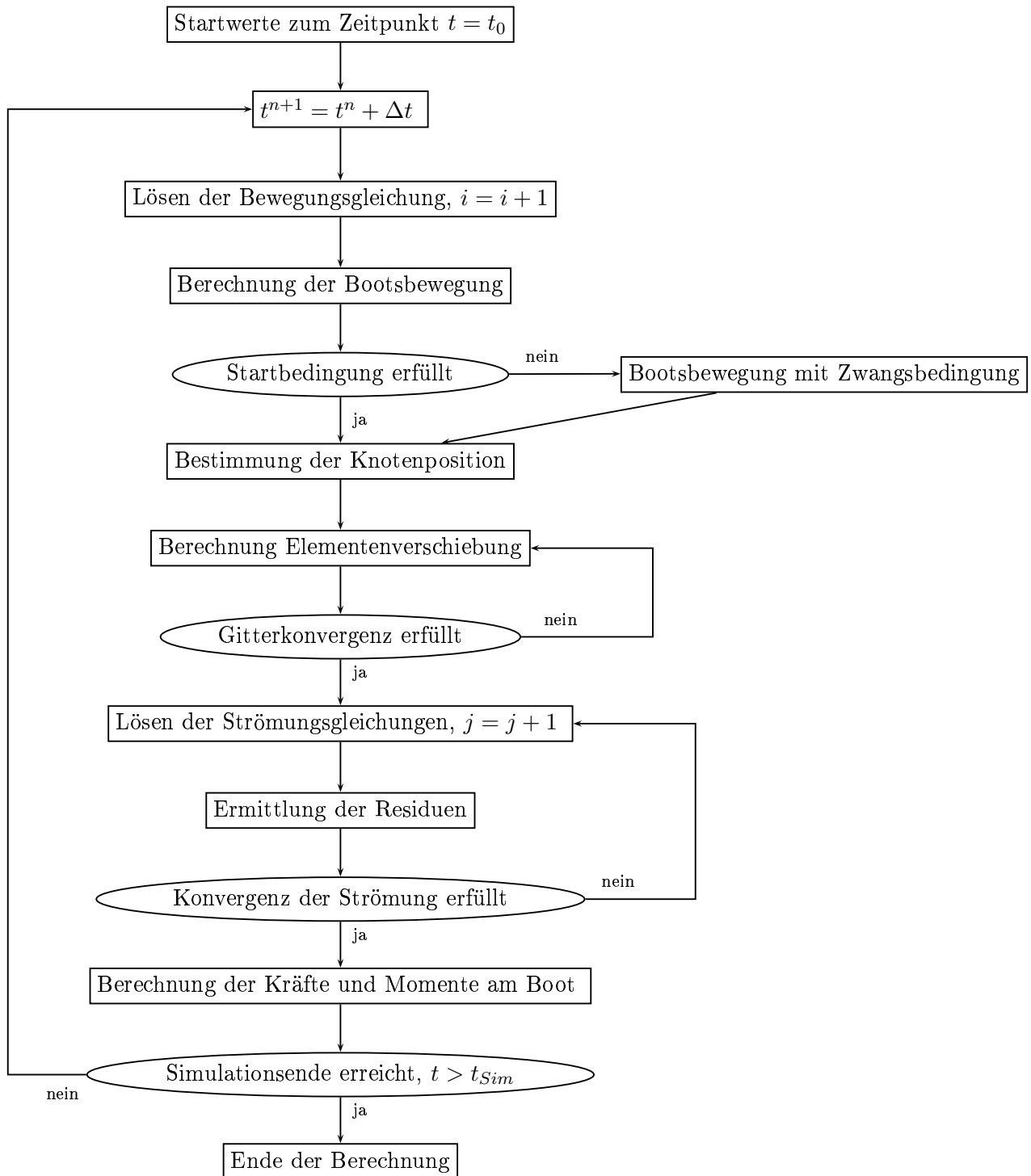


Abbildung 5: Algorithmus des Gesamtverfahrens

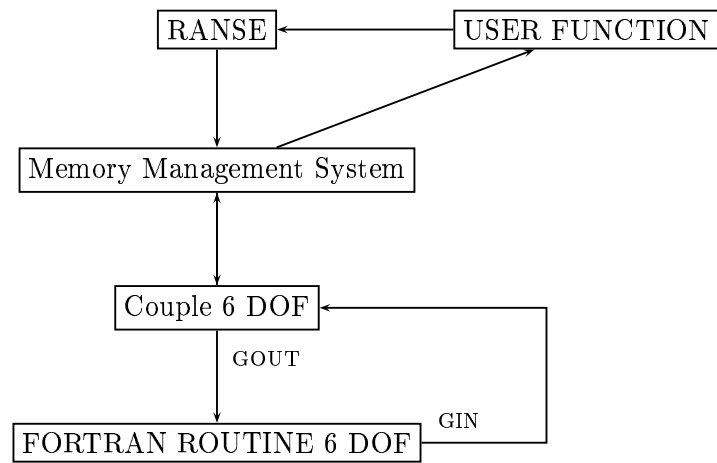


Abbildung 6: Anbindung der User Routinen

3 Dynamische Rechengitter

Zur numerischen Lösung der RANS Gleichungen muß das Strömungsgebiet in eine endliche Anzahl von Volumenelementen unterteilt werden. In diesen Teilgebieten können dann die Gleichungen für die unbekannten Variablen numerisch approximiert werden. Die Verteilung der Gitterpunkte im Rechengebiet erfolgt nach dem Prinzip der möglichst feinen Auflösung der Strömungsgradienten. Bei der Generierung des Rechengitters ist darauf zu achten, daß die zu untersuchende Geometrie möglichst exakt abgebildet wird. Jedoch ist bei der Gittergenerierung zu berücksichtigen, daß die Erhöhung der Elemente immer eine Erhöhung der Rechenzeit bewirkt. Aus diesem Grund sollten bei der Netzgenerierung im Vorfeld Überlegungen angestellt werden, wie ein logischer Gitteraufbau auszusehen hat. Eine effektive Anordnung der Gitterknoten ist dadurch gekennzeichnet, daß die Gitterpunkte in Bereichen verdichtet werden, wo die Gradienten der Lösungsvariablen der Strömung groß sind und in Bereichen kleiner Gradienten die Anzahl der Elemente reduziert wird. Dabei lassen sich die Gitter in zwei Hauptgruppen unterteilen, strukturierte Gitter und unstrukturierte Gitter.

Bei strukturierten Gittern ist die Anzahl an Gitterpunkten entlang einer Raumachse konstant, d.h. jede Elementenreihe entlang einer Raumrichtung besteht aus der gleichen Anzahl von Volumenelementen.

Unstrukturierte Gitter sind dadurch gekennzeichnet, daß keine Regelmäßigkeit bezüglich der Knotenanordnung ersichtlich ist. Die Vernetzung komplexer Geometrien ist mit dieser Methode wesentlich einfacher und kann weitestgehend automatisiert werden.

Bei der Berechnung von Bootsumströmungen muß ein besonderes Augenmerk auf die Auflösung der Grenzschicht am Schiffskörper gelegt werden. Dabei liefern Rechnungen mit strukturierten Hexaedergittern bei gleichem Rechenaufwand bessere Ergebnisse als Rechnungen mit unstrukturierten Tetraedergittern. Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Arbeit die Berechnungen mit Hexaedergittern durchgeführt.

Um dynamische Vorgänge mit einem RANSE-Verfahren simulieren zu können, gibt es bei der Modellierung verschiedene Ansätze, die im Folgenden näher erläutert werden.

3.1 Simulation der Bootsbewegung mit Hilfe von starren Gittern

Eine „klassische“ numerische Widerstandsberechnung für einen Schiffskörper simuliert ein strömendes Becken mit einer darin befindlichen Geometrie. Das die Geometrie umschließende Rechengebiet ist während der Berechnungsdauer stationär an einem Ort. Auf der Zuflußseite wird die Anströmgeschwindigkeit des Bootes vorgegeben und am Auslaß wird üblicherweise eine Druckrandbedingung gewählt. Auf diese Weise können örtlich stationäre Berechnungen durchgeführt werden.

Um jedoch die Strömung um ein manövrierendes Boot zu simulieren, müssen bei starren Gittern die Randbedingungen für jeden Zeitschritt modifiziert werden, um immer die für den Zeitschritt entsprechende Anströmung zu gewährleisten. Da dieser Fall dann das bootsfeste System als Bezugssystem annimmt, müssen die Zentrifugal- und die Corioliskraft im globalen Koordinatensystem des Berechnungsprogramms berücksichtigt werden. Das bedeutet, daß die Kraft und Momententerme der RANSE Berechnung um zusätzliche Ausdrücke erweitert werden müssen. In den Momentengleichungen muß in dem mit der Winkelgeschwindigkeit Ω rotierenden Bezugssystem ein zusätzlicher Momententerm $\vec{S}_{M,rot}$ eingefügt werden. Dieser setzt sich aus der Corioliskraft \vec{S}_{kor} und der Zentrifugalkraft \vec{S}_{zfg} zusammen.

$$\vec{S}_{M,rot} = \vec{S}_{kor} + \vec{S}_{zfg} \quad (3.1)$$

$$\vec{S}_{kor} = -2\rho\Omega \times \vec{U} \quad (3.2)$$

$$\vec{S}_{zfg} = -\rho\Omega \times (\Omega \times \vec{\rho}) \quad (3.3)$$

Dabei ist \vec{r} der Ortsvektor des betreffenden Elementes und \vec{U} der relative Geschwindigkeitsvektor. Die erwähnten Modifizierungen wären nur durch einen Eingriff in den Quellcode des Programmsystems möglich der nicht verfügbar ist. Bei der Betrachtung eines Kontrollvolumens in einem rotierenden System werden die ergänzenden Terme für die Beschleunigung aus der Corioliskraft und für die Beschleunigung aus der Zentrifugalkraft angehängen. Dadurch läßt sich die Beschleunigung eines Punktes im Inertialsystem folgendermaßen darstellen [16].

$$\underbrace{\dot{\vec{U}}(P)}_1 = \underbrace{\dot{\vec{U}}}_2 + \underbrace{\dot{\vec{U}}_{xyz}(P)}_3 + \underbrace{2\Omega \times \vec{U}_{xyz}(P)}_4 + \underbrace{\dot{\Omega} \times \rho(P)}_5 + \underbrace{\Omega \times (\Omega \times \rho(P))}_6 \quad (3.4)$$

1. Beschleunigung eines Punktes P im Inertialsystem
2. Beschleunigung des Ursprungs des bewegten Koordinatensystems relativ zum Inertialsystem
3. Beschleunigung eines Punktes P relativ zum bewegten Koordinatensystem
4. Coriolisbeschleunigung
5. Winkelbeschleunigung eines Punktes P relativ zum bewegten Koordinatensystem
6. Zentrifugalbeschleunigung eines Punktes P relativ zum bewegten Koordinatensystem

3.2 Simulation der Bootsbewegung mit Hilfe von verzerrten Gittern

Eine weitere Möglichkeit der Berechnung von beweglichen Objekten stellt die Gitterverzerrung dar. Bei dieser Methode muß bei der Gittergenerierung die geplante Bewegung des Körpers berücksichtigt werden, um dann den Netzaufbau entsprechend vorzunehmen. Bei der verwendeten Methode waren die Ränder des Rechengitters fest und wurden nicht bewegt. Für die Umsetzung von Gitterbewegungen in ANSYS CFX kann die „Mesh-Movement“ Funktion des Softwarepaketes verwendet werden. Dabei wird für jeden Gitterpunkt der Verschiebeweg oder eine absolute Position für jeden Zeitschritt ermittelt. Das Programmpaket stellt sicher, daß trotz der Gitterverzerrung die Erhaltungsgleichungen für jedes Volumen weiter erfüllt werden. Im hier beispielhaft dargestellten zweidimensionalen Fall muß sich die Summe aller Massenströme ($\dot{m}_n, \dot{m}_e, \dot{m}_s, \dot{m}_w$) sowohl im kartesischen, als auch im deformierten Kontrollvolumen aufheben, Abbildung (7).

Die Bestimmung der Knotenverschiebung erfordert zur Verminderung negativer Beeinflussung der Gitterqualität die Diffusion der Verschiebung eines Knotens auf die benachbarten Knoten. Diese Verteilung auf die Nachbarknoten erfolgt durch das Lösen der Gleichung (3.5).

$$\nabla \cdot (\Gamma_{disp} \nabla \delta) = 0 \quad (3.5)$$

Dabei ist δ die Relativverschiebung eines Gitterpunktes innerhalb eines Zeitschrittes und Γ_{disp} gibt die „Mesh Stiffness“ an. Die „Mesh Stiffness“ wird über einen Gradienten ∇ an-

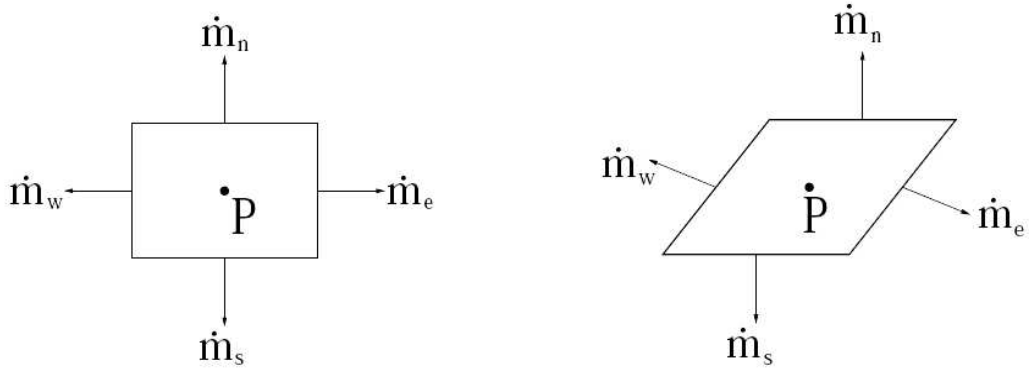


Abbildung 7: Massenfluss an einem kartesischen und an einem deformierten Gitterelement [41]

gegeben. Dieser beschreibt, wie weit die lokale Verformung des Netzes in das Rechengitter wirkt. Gleichung (3.5) wird zu Beginn jeden Zeitschrittes gelöst. Das Diffusionsmodell dient dazu, die ursprüngliche Gitterqualität über die Rechendauer zu bewahren. Die Wahl des Faktors Γ_{disp} ermöglicht die Steifigkeit gitterabhängig zu beeinflussen.

Für die Bewegung des U-Bootes im Rechengebiet mit feststehenden Begrenzungen ergibt sich für jeden Knotenpunkt des Rechengebietes eine unterschiedlich starke Gitterverzerrung. Die Bewegung des Bootes verlangt, daß sich das Rechengitter in dem Bereich um das Boot nur sehr gering verformt, um so eine gleichbleibende Netzqualität um das Boot zu gewährleisten. Des weiteren muß die Gittersteifigkeit zu den Rändern des Rechengebietes hin abnehmen, um die große Bewegung des Gitters aufnehmen zu können. Dies wird durch eine Variation der Steifigkeit in Abhängigkeit der Entfernung d oder des Volumens Ω eines Elementes realisiert (3.6),(3.7). Mit dem Steifigkeitsfaktor C_{stiff} kann der Gradient der Steifigkeitszunahme beeinflusst werden.

$$\Gamma_{disp} = \left(\frac{1}{\Omega}\right)^{C_{stiff}} \quad (3.6)$$

$$\Gamma_{disp} = \left(\frac{1}{d}\right)^{C_{stiff}} \quad (3.7)$$

Für die translatorischen Bewegungen konnte diese Methode erfolgreich umgesetzt wer-

den, was in zahlreichen Testrechnungen bewiesen wurde. Durch die Verwendung einer mittleren Anströmgeschwindigkeit kann die Bewegung in horizontaler oder vertikaler Richtung reduziert werden, wenn die Bootsbewegung bekannt ist. Auch die Stampfbewegung wurde erfolgreich umgesetzt und getestet. Bei der Realisierung von Rollbewegungen stößt das verwendete Konzept an seine Grenzen. Große Rollwinkel erfordern eine starke Verzerrung der einzelnen Elemente. Dabei können bei großen Winkeln im verzerrten Netz negative Volumina auftreten, so daß die Rechnung aufgrund mangelhafter Gitterqualität abbricht.

Wichtig bei der Berechnung ist, daß die Gleichung für die Raumerhaltung (2.59) der einzelnen Elemente erfüllt wird, da ansonsten durch die starken Verzerrungen künstliche Massenquellen in den Erhaltungsgleichungen auftreten können. Die bereits oben beschriebene Problematik der sich ändernden Volumina der einzelnen Elemente von einem Zeitschritt zum nächsten wirkt sich bei diesem Verfahren besonders aus. Je komplexer die zu untersuchende Geometrie ist, desto schwieriger wird die Berechnung mit der hier vorgestellten Methode, da in der Gitterstruktur dann große Differenzen in der Elementgröße und Verteilung bestehen.

Eine Möglichkeit dem Problem der negativen Elemente zu entgehen, besteht in einer Erweiterung des Verfahrens um einen eigenständigen Gitterbereich. Dabei wird der Bereich um die zu bewegende Geometrie in einer eigenständigen Subdomain vernetzt und über Interfaces mit Gleitrandbedingungen an das restliche Gitter gekoppelt. Um besonders die problematischen rotatorischen Bewegungen aus der Gitterbewegung zu entfernen, ist eine kugelförmige Subdomain sinnvoll. Dabei kann diese dann die rotatorischen Bewegungen umsetzen und das Rechengitter im Fernfeld muß ausschließlich translatorische Bewegungen realisieren. An der Interfacefläche können die einzelnen Bereiche aneinander vorbeigleiten, ohne die Bewegung des benachbarten Gitters zu stören. Jedoch wird in diesem Fall die translatorische Körperbewegung durch die Randbereiche des Gitters beschränkt.

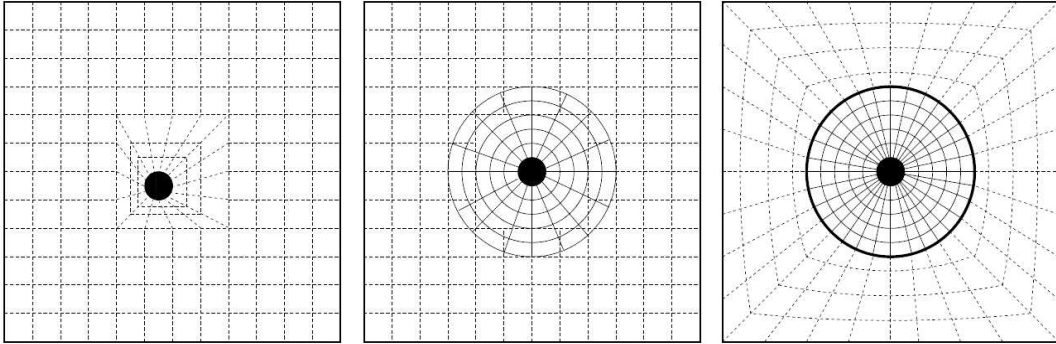


Abbildung 8: Methoden zur Realisierung von bewegten Körpern in numerischen Gittern; v.l. verzernte Gitter, chimere Gitter, bewegte Gitter [41]

3.3 Überlappende Gitter

Die Verwendung überlappender Gitter ist eine weitere Methode zur Realisierung von Körperbewegungen in einem Rechengitter. Dieses Verfahren ist auch als „Chimere“ oder „Overset“ Technik bekannt, Abbildung (8). Diese Methode verwendet zwei oder mehr beliebige Rechengitter, die sich überlappen. Dabei bildet ein Gitter das Rechengebiet ohne die eigentliche Geometrie mit einem Hintergrundgitter ab, wobei hierbei eine sehr gute Gitterqualität erzeugt werden kann. Die anderen Rechengitter diskretisieren dann in einem kleinen Bereich die eigentliche Geometrie [18]. Dafür wird das starre, die zu bewegend Geometrie umschließende Netz auf das Grundgitter gelegt. Eine Kopplung zwischen den Netzen erfolgt entweder über eine wechselseitige Interpolation oder über eine interne Flußkopplung im überlappenden Bereich [17].

Bei dem Konzept der überlappenden Gitter zur Simulation von bewegten Körpern gibt es in jedem Zeitschritt verschiedene Bereiche im Rechengebiet. Zunächst gibt es den Bereich, der nur von dem Hintergrundgitter abgedeckt ist. Dort werden die bekannten Berechnungsverfahren, wie oben beschrieben, eingesetzt. Ein zweiter Bereich ist dort, wo die Geometrie sich befindet. In diesem Bereich befindet sich das Hintergrundgitter, aber drübergelegt ist ein „Loch“ im überlappenden Gitter. Die betroffenen Zellen des Hintergrundnetzes müssen zu diesem Zeitpunkt deaktiviert werden und die Wandinformationen der Geometrie müssen auf das hintere Rechengitter übertragen werden. Daneben gibt es Bereiche, in denen sich das Gitter um die Geometrie und das Hintergrundgitter überlap-

pen. In diesen Bereichen ist ein Regelwerk der gegenseitigen Abhängigkeiten erforderlich. Eine Möglichkeit besteht in der Definition verschiedener Hierarchieebenen mit unterschiedlichen Prioritäten, so daß im Überlappungsbereich das Gitter der höheren Hierarchieebene den Strömungszustand vorgibt. Das ist in dem beschriebenen Fall das starre Gitter um die Geometrie. An den Rändern dieses Gitters werden dagegen die Informationen vom Hintergrundgitter übernommen [18]. Gerade diese Kopplung der verschiedenen Teilgitter ist Gegenstand vieler Forschungsarbeiten [14], [17], [18], [19]. Bei diesen Arbeiten werden verschiedenen Vorgehensweisen und Methoden für die Übergabe der Elementinformationen erarbeitet und Interpolationsverfahren für die Kopplung untersucht.

Vorteilhaft bei der Verwendung überlappender Gitter ist die Möglichkeit der Untersuchung von Mehrkörpersystemen, die sich gegenseitig beeinflussen. Des weiteren ist die Modellierung der Umwelt im Hintergrundgitter möglich, wodurch eine Berücksichtigung der freien Oberfläche [14] oder von Flachwassereffekten [17] zu realisieren ist. Jedoch begrenzt die Ausdehnung des Hintergrundgitters gleichzeitig den Simulationsbereich und es werden für großräumige Bewegungssimulationen sehr große Rechengebiete erforderlich, die den Rechenaufwand ansteigen lassen. Nachteilig ist die verringerte Genauigkeit bei der Erfüllung der Massen- und Impulsgleichungen an den Rändern des bewegten Gitters, die durch die Interpolation der Werte entstehen können.

3.4 Bewegte Gitter

Zur Realisierung der Bootsbewegung besteht eine weitere Alternative zu den bisher vorgestellten Verfahren, welche hier zur Anwendung kam. Das neu entwickelte Verfahren verzerrt nicht mehr das Gitter, sondern die Bootsgeometrie und das komplett die Geometrie umgebende Rechengitter werden entsprechend der Lage zum Bezugspunkt bewegt. Dabei ähnelt das Verfahren der Methode der überlappenden Gitter, jedoch entfällt der Datenaustausch zwischen Vorder- und Hintergrundgitter. Das Hintergrundgitter ist bei dieser Methode nicht notwendig, wenn die Ausdehnung der Domain sicherstellt, daß im Außenbereich des bewegten Rechengitters eine vom Boot ungestörte Strömung vorliegt und die Strömung in diesem Bereich steht oder bekannt ist. Jedoch muß die bewegte Domain einen größeren Bereich um die Geometrie abdecken, als dies bei überlappenden

Gittern der Fall ist. Dies resultiert daraus, daß bis zum Rand des Rechengebietes der Einfluß der Geometrie auf die berechnete Strömung abklingen muß, damit die Randbedingungen passend definiert werden können. Bei dem hier vorgestellten Verfahren bleibt die Gitterqualität zu jedem Zeitpunkt der Berechnung gleich, da an den einzelnen Knoten relativ zueinander keine Verschiebung erfolgt. Durch die Anpassung der Randbedingungen können mit dieser Variante sehr komplexe Bootsbewegungen im Rechnermodell simuliert werden.

Ein weiterer Vorteil ist die einfachere Netzgestaltung, da nicht mehr die unterschiedlich großen Gitterverzerrungen berücksichtigt werden müssen. Die Abhängigkeit der Netzsteifigkeit von der Zellengröße und vom Abstand zum Boot entfällt. Durch die Abkopplung von einem Hintergrundgitter, ist die Bewegung der zu untersuchenden Geometrie in allen sechs Freiheitsgraden räumlich unbegrenzt. Da das Rechengebiet die gleiche Bewegung durchführt die das fest eingebettete Boot vorgibt, gibt es keine Begrenzungen in den drei Koordinatenachsen. Eine Unterteilung in Einlaß und Auslaß entfällt ebenfalls. Das Fluid kann das Rechengebiet von allen Seiten durchströmen. Die Geschwindigkeit am Rand des Rechengebietes wird auf 0 ms^{-1} relativ zum globalen Koordinatensystem gesetzt, wenn das Boot sich durch ein ruhendes Fluid bewegen soll. Jedoch können auch Strömungen im Rechengebiet vordefiniert werden, falls ein Boot in strömender Umgebung betrachtet wird.

Bei der hier vorgestellten Variante ist die sonst für CFD-Berechnungen übliche Vorgehensweise, nämlich daß ein stehender Körper angeströmt wird, umgedreht. Dadurch ähnelt dieses Vorgehen mehr der Situation in der Realität. Die Strömung um das Boot bildet sich durch die Bewegung des Rumpfes relativ zum Fluid wie gewohnt aus, während im Fernfeld das Wasser eine definierte Geschwindigkeit hat oder in Ruhe ist.

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, stellt die Lösung der Erhaltungsgleichungen in bewegten Gittern mathematisch kein Problem dar, wenn diese mit den Relativgeschwindigkeiten gebildet werden (2.55), (2.56).

Durch die Verwendung eines starren Gitters um das Unterseeboot, welches sich relativ zueinander nicht verändert, ändert sich auch nicht das Volumen eines Kontrollvolumens von einem Zeitschritt zum Nächsten. Es können somit keine künstlichen Massenquellen

auftreten. Gleichung (2.58) vereinfacht sich dann zu Gleichung (3.8).

$$\frac{(\Delta\Omega)^{n+1} - (\Delta\Omega)^n}{\Delta t} = 0 \quad (3.8)$$

Wenn bei der Berechnung inkompressibler Fluide während der Gitterbewegung sichergestellt ist, daß die Massenerhaltung für jedes Kontrollvolumen Gültigkeit hat (3.9), beeinflußt die Gitterbewegung nicht die Lösung der Druckterme [13].

$$\int_S \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (3.9)$$

3.5 Ruderbewegung

Für die Simulation von Bootsmanövern muß neben der globalen Bewegung des Bootes auch eine lokale Bewegung der Bootsanhänge stattfinden. Dabei handelt es sich meistens um Rotationen um definierte Drehachsen am Boot. Die meisten Überwasserschiffe besitzen ein Ruder am Heck des Schiffes oder in einigen Fällen auch zwei Ruder, die zur Steuerung dienen. Bei der Berechnung der Umströmung von Überwasserschiffen ist dadurch ausreichend Platz vorhanden, um die Ruderbewegung im Rechengitter zu simulieren.

Anders sieht es bei der Simulation der Bewegung von Unterseebooten aus. Diese besitzen in der Regel sechs Ruder, die in den unterschiedlichsten Konfigurationen ausgeführt sein können [9]. Dabei handelt es sich in der Regel um zwei Tiefenruder, die möglichst weit vorne am Rumpf montiert sind oder die am Turm des Bootes angebracht sind, und um vier Ruder am Heck des Bootes. Die unterschiedlichen Konfigurationen und Funktionsweisen der in den letzten Jahrzehnten entwickelten vorderen Tiefenrudervarianten, erfordern individuelle Lösungen bei der Realisierung der Ruderbewegung im Rechengitter.

So gibt es Varianten, die nur zum Manövrieren ausgefahren werden oder Rudervarianten wie beispielsweise das Muschelruder, welches entsprechend dem gewünschten zu erzeugenden Auftrieb ausgeschwenkt wird [20]. Die in den letzten Jahren in Deutschland gebauten Unterseeboote besitzen jedoch ausschließlich Tiefenruder, die um eine feststehende Achse rotieren, so daß in dieser Arbeit auch nur diese Tiefenruder bei der

Modellierung berücksichtigt wurden, Abbildungen (32),(33),(34),(35).

Wie für die vorderen Ruder gibt es auch für die Ruderanordnung im Heckbereich eine Anzahl verschiedener Varianten. Dabei haben sich Kreuzruder- und X-Ruderanordnungen durchgesetzt, Abbildung (9c, 9d). Allen Ruderanordnungen im Heckbereich von konventionellen Unterseebooten gemein, ist der knapp bemessene Raum zur Anordnung der Ruder. Die strömungsgünstige Formgebung im Heckbereich führt zu einer so starken Einschnürung des Hinterschiffes bis zum Propeller, daß die Ruderanordnung eine Gittergenerierung in diesem Bereich sehr erschwert, Abbildung (9). Zur Realisierung der Ruderbewegung sind verschiedene Techniken möglich, die auf den bisher beschriebenen Bewegungsverfahren basieren.

3.5.1 Gitterdeformierung

Eine Möglichkeit zur Umsetzung der Ruderbewegung besteht in der Modellierung federnder Gitterbereiche um das bewegte Ruder [21]. Das Prinzip dieser Methode besteht darin, die vorgegebene Bewegung einer Wand, in diesem Fall eines Ruders, auf das umgebende Netz auszubreiten. Dabei müssen schlechte Zellen durch Gitterdeformation oder unbeabsichtigt überlappende Gitter vermieden werden. Durch eine Kombination von stauchenden Federelementen und tordierenden Federelementen kann die Ruderbewegung im Rechengitter realisiert werden. Dazu wird das Rechengitter in drei Bereiche aufgeteilt. Ein Bereich in dem die Gitterelemente keine Änderung durch die Ruderbewegung erfahren Γ_0 , ein zweiter Bereich der die Knoten beinhaltet, die durch die Bewegung der Geometrie beeinflusst werden Γ_m . In diesem Bereich vollziehen die Knoten die Bewegung der Oberfläche mit. Ein dritter Bereich wird definiert, in dem die Knoten auf die Oberfläche der Geometrie projiziert werden Γ_p .

$$\Gamma = \Gamma_m + \Gamma_0 + \Gamma_p \quad (3.10)$$

Wenn \vec{d}_i und \vec{d}_j die Verschiebung zweier Punkte M_i und M_j eines Elementes im Rechengitter mit dem Abstand l_{ij} darstellen, dann kann der Einheitsvektor folgendermaßen

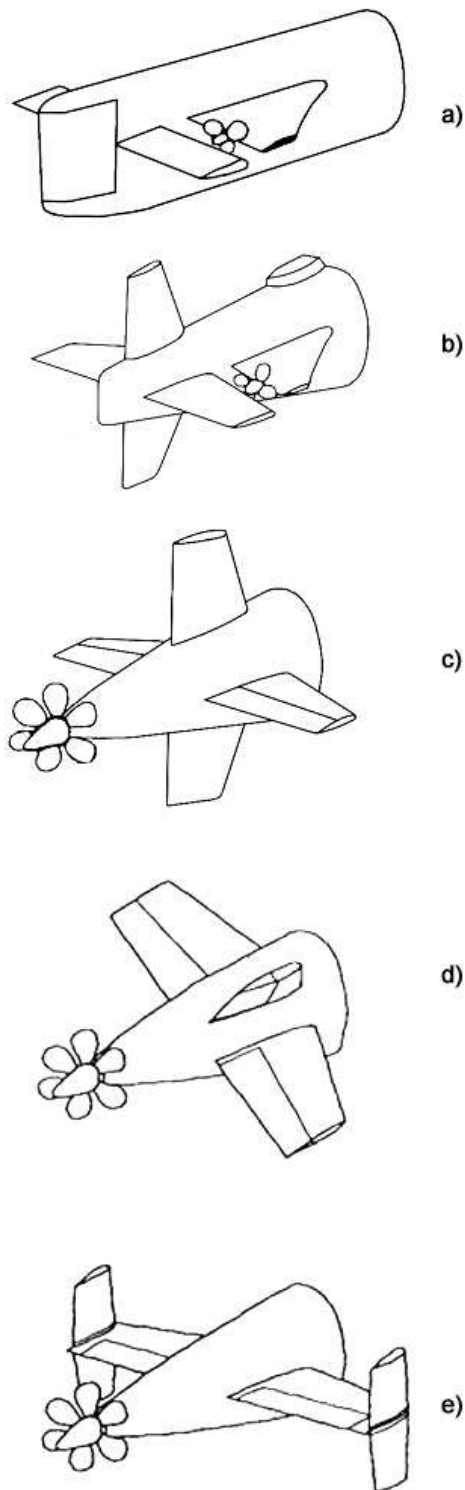


Abbildung 9: Hinterschiffsformen von Unterseebooten [9]

definiert werden.

$$\vec{i}_{ij} = \frac{\vec{e}_{ij}}{l_{ij}} \quad (3.11)$$

Durch die Längenänderung $(\vec{d}_j - \vec{d}_i) \cdot \vec{i}_{ij}$ der Elementenseite kann eine Federkraft auf den Punkt M_j ermittelt werden.

$$\vec{f}_{ij} = k_{ij}((\vec{d}_j - \vec{d}_i) \cdot \vec{i}_{ij}) \cdot \vec{i}_{ij} \quad (3.12)$$

Dabei wird die Federsteifigkeit üblicherweise über die Inverse des Abstandes definiert, so daß große Zellen weicher sind als kleine.

$$k_{ij} = \frac{1}{l_{ij}} \quad (3.13)$$

Durch die Kombination der Federsteifigkeit mit einem weiteren Faktor, der die Steifigkeit eines Elementes erhöht, falls die Winkel zwischen den einzelnen Kanten i, j, k zu klein werden, kann die Verteilung der Deformierung im Rechenggebiet noch effektiver umgesetzt werden [21].

$$C_i^{ijk} = \frac{1}{\sin^2(\theta_i^{ijk})} \quad (3.14)$$

Von Vorteil bei dieser Methode ist, daß kein zusätzliches Rechengitter um die beweglichen Teile modelliert werden muß und das keine Kopplungsprobleme wie z.B. bei der Verwendung von Interfaces auftreten können [7]. Auch können andere Bewegungen als reine Rotationen durchgeführt werden. Nachteilig sind jedoch die begrenzten zu realisierenden Ruderausschläge, bevor die Gitterqualität zu schlecht wird. Maximale Ruderwinkel von 10-15 Grad, wurden bei einfachen Geometrien bisher realisiert [21], [7].

3.5.2 Überlappende Gitter

Die bereits oben beschriebene Chimere Technik bietet eine weitere Möglichkeit Ruderbewegungen oder andere Relativbewegungen bezüglich der Bootsgeometrie im Rechengitter zu simulieren. Diese Technik wurde bereits erfolgreich bei der Simulation rotierender Propeller eingesetzt [17]. Von großem Vorteil ist die Möglichkeit, sehr einfach verschiedene

Geometrien zu testen, da keine spezielle Anpassung des Hintergrundgitters erforderlich ist. Rechengitter mit den einzelnen Rudergeometrien können dann für jede Rechnung in das Hauptgitter des Bootes integriert werden. Die Relativbewegungen der einzelnen Teilgitter zueinander, erfolgten über die Kombination der einzelnen translatorischen und rotatorischen Gitterverschiebungen, entsprechend der zugehörigen Hierarchieebene.

Nachteilig bei dieser Methode ist, daß die Lösungen sequentiell erfolgen, d.h. die Strömungsgleichungen werden erst in dem einen Gitter und dann in dem anderen Rechengitter gelöst [13]. Die interpolierte Lösung des ersten Rechenggebietes liefert die Randbedingungen für die nächste Iteration des überlappenden Gitters. Bei der Übergabe der Zustandsgrößen von einem Rechenggebiet in das andere, kann die Interpolation an den Gittergrenzen zu Konvergenzproblemen führen, wenn dort große Strömungsgradienten vorliegen [13]. Dies kann zu Problemen bei der Massenerhaltung führen, gerade im Nachstrombereich eines Unterseebootes, da dort die verschiedenen Anhänge und die Turmwirbel stark inhomogene Strömungsbereiche mit großen Geschwindigkeits- und Druckgradienten bewirken.

3.5.3 Neuvernetzung

Eine weitere Alternative zur Simulation der Ruderbewegung besteht darin, das Rechengitter mit dem entsprechenden Ruderausschlag neu zu vernetzen. Dadurch kann für jede Ruderstellung die optimale Gitterqualität erzeugt werden und die Gitterstruktur kann der zu erwartenden Strömung angepaßt werden. Bei dieser Methode wird für jede neue Ruderstellung ein neu vernetztes Rechengitter eingeladen und zur Fortsetzung der Berechnung verwendet. Jedoch ist der Aufwand für die Gittergenerierung sehr zeitintensiv. Dies würde bei der Modellierung von sechs Rudern mit unterschiedlichen Ruderwinkeln zu einem enormen Mehraufwand bei der Berechnungsvorbereitung führen. Nachteilig ist darüber hinaus die im Vorfeld festgelegte Abstufung der Schrittweiten der einzelnen Ruderwinkel, dies erfordert für eine stetige Berechnung mit anderen Zeitschritten eine erneute Gittergenerierung.

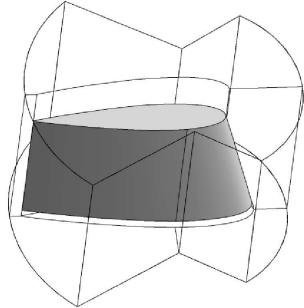


Abbildung 10: Domain Geometrie

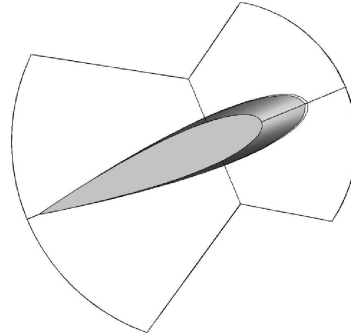


Abbildung 11: Draufsicht auf die Domain

3.5.4 Eigenständige Ruderdomain

Eine bewährte Technik für die Realisierung der Ruderbewegung besteht in der Verwendung einer eigenen Domain um das bewegliche Ruder, Abbildungen (10),(11), [14]. Dieses eigenständige Netz wird über Interfaces an das übrige Rechengebiet angebunden. Die durch das Interface getrennten Knotenpunkte können dann aneinander vorbeigleiten und die zu jedem Zeitpunkt korrespondierenden Zellen werden für die Strömungsberechnung herangezogen. Die zeitabhängige Position des rotierenden und des nicht rotierenden Gitterbereichs werden in jedem Zeitschritt berücksichtigt. Die „Sliding“ Interfaces gewährleisten dabei den Massenfluß zwischen der ruhenden und der beweglichen Domain. In den Erhaltungsgleichungen wird bei der Berechnung der rotierenden Domain der Einfluß der Coriolis- und Zentrifugalkraft, wie bereits oben beschrieben, berücksichtigt [22]. Diese Methode hat sich bei der Berechnung rotierender Propeller bewährt [27]. Dabei wird im Rechengitter des Bootes an der Position des Propellers eine zylindrische Aussparung gelassen, in die der Propeller mit einem entsprechenden Netz eingesetzt werden kann.

Wenn die Ruderachse mit der Rotationsachse des Zylinders deckungsgleich ist, kann die gleiche Methode, die zur Berechnung der Propellerrotation dient, zur Berechnung der

Ruderdrehung verwendet werden. Dadurch kann, bei gleichbleibender Gitterqualität um das Ruder, die Ruderbewegung bei der Strömungssimulation berücksichtigt werden.

Um eine gute Kopplung zwischen dem ruhenden und dem bewegten Rechengebiet über das Interface zu ermöglichen, sollten die Kantenlängen am Interface auf der feststehenden Seite l_f , der Kantenlänge l_m auf der bewegten Seite entsprechen und keine großen Sprünge in der Gitterstruktur enthalten.

$$l_f \cong l_m \tag{3.15}$$

Die für jedes Berechnungsgitter geltende Anforderung an die Gitterqualität, kann bei Nichtbeachtung, bei der Zuordnung der Volumenelemente auf der einen Seite, zu den Elementen auf der anderen Seite des Interfaces, zu fehlerhaften Ergebnissen führen.

Durch die eingeschränkten Platzverhältnisse im Hinterschiffsbereich eines Unterseebootes können zylinderförmige Ruderdomains nicht verwendet werden, da diese sich überlappen würden. Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Arbeit für die Rudervernetzung zwei ineinander geschobene Zylindersegmente verwendet, die so die kreisförmige Bewegung der Rudervorderkante und Ruderhinterkante ermöglichen, Abbildungen (10),(11),(36),(37). An diesen Interfaceflächen erfolgt die Kopplung des bewegten Gitters an das ruhende Gitter. „Sliding“ Interfaces werden auch für die Kopplung der Stirnfläche der Ruderdomain an das umgebende Rechengebiet verwendet. Durch die Geometrie der Ruderdomain kann keine reine Rotationsbewegung aller Knotenpunkte um die Drehachse erfolgen, so daß sowohl „Sliding“ Interfaces als auch Gitterverzerrung kombiniert werden. Das gewährleistet, daß die Geometrie der Begrenzung der Ruderdomain, über die Simulationszeit betrachtet, starr bleibt und über Interfaces an das umgebende Rechengebiet gekoppelt ist. Die Knotenpunkte in der Ruderdomain bewegen sich auf einer Kreisbahn um die Drehachse des Ruders. Die Knoten zwischen dem Ruder und der feststehenden seitlichen Interfacefläche werden je nach Ruderstellung durch Gitterverzerrung moderat gedehnt oder gestaucht. Durch unterschiedliche Netzsteifigkeiten bleibt das Netz, welches das Ruder unmittelbar umgibt, von annähernd konstanter Qualität und erst etwas vom Ruder entfernt ändert sich die Zellgröße. Dieses Verfahren erlaubt, bei begrenzten Platzverhältnissen des Rechengebietes, die Realisierung von Ruderwinkel bis zu 40 Grad, Abbildungen (38),(39),(40), [23]. Für die Realisierung eines Halbschweberuders kann das gleiche Verfahren verwendet werden. Dabei wird durch die Drehachse eine Trennfläche

gezogen, auf der die Gitterpunkte fixiert werden. Diese Fläche trennt dann den hinteren Teil der Ruderdomain von dem vorderen Ruderbereich ab. Durch die Trennung entstehen zwei zusätzliche, eigenständige Gitterbereiche auf jeder Seite des Ruders, die durch ein Interface miteinander verbunden sind. Für die Gitterpunkte im vorderen Teil der Ruderdomain werden dann ausschließlich die globalen Knotenverschiebungen berechnet und nicht mehr die lokalen rotatorischen Bewegungen. Dadurch werden die Gitterpunkte in diesem Bereich nicht mehr relativ zum umgebenden Gitter des Bootes bewegt, Abbildungen (41),(42).

Wenn die untere Ruderkannte nicht senkrecht zur Ruderdrehachse steht, sondern beispielsweise dem Verlauf der Bootskontur angepaßt ist, so muß die Geometrie der Ruderdomain ebenfalls angepaßt werden. In diesem Fall beschreibt nämlich die Ruderunterseite des vorderen Bereichs eine konkave Bahnkurve und der hintere Ruderbereich eine konvexe Bahnkurve, Abbildungen (43). Da die Rudergeometrie eine gewisse Breite besitzt, ergeben sich für jeden Punkt der Ruderunterseite bei einer Rotationsbewegung um die Drehachse unterschiedliche Bahnkurven. Um dennoch eine über die Berechnungsdauer unveränderliche Außenberandung der Ruderdomain verwenden zu können, wird ein Spalt von geringer Breite zwischen Ruderunterseite und Domainbegrenzung bei der Geometrieerzeugung eingefügt, Abbildungen (12),(13).

Für die Gitterpunkte auf der Domaingrenze muß somit nach jeder durchgeführten Rotation eine Lagekorrektur durchgeführt werden, da sich die Punkte ansonsten von dem Domaininterface abheben würden. Dies bedeutet, daß die Zellen, die sich in dem Spalt zwischen Ruderunterseite und Interfacebegrenzung befinden, gestaucht oder gestreckt werden. Während die Punkte auf der Ruderunterseite nur die rotatorische Bewegung vollziehen, erfahren die Punkte auf der Interfacefläche zusätzlich eine translatorische Verschiebung. Dabei werden die betroffenen Punkte parallel zur Drehachse auf eine zuvor erzeugte Grenzfläche projiziert, die so die Interfacebegrenzung bildet, Abbildung (44). Diese Grenzfläche wird durch ein Kegelsegment erzeugt, welches der Hinterschiffskontur angenähert wird, Abbildung (37). Dieses Kegelsegment kann vor der Berechnung geome-

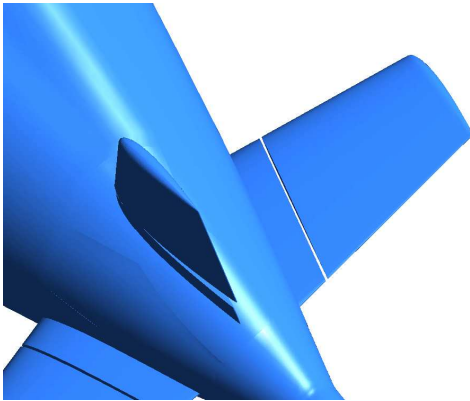


Abbildung 12: X-Ruderanordnung mit
Spalt zwischen Ruder
und Ruderstuhl



Abbildung 13: X-Ruderanordnung mit
Spalt zwischen Ruder
und Ruderstuhl

trisch über zwei Punkte P1 und P2 sowie zwei Radien R1 und R2 beschrieben werden, so daß die Fläche zu jedem Zeitpunkt der Berechnung über die vor Beginn der Rechnung definierten Punkte bestimmt werden kann, Abbildung (14). Durch die Verwendung dieser Interfacefläche kann der bewegliche Gitterteil des Ruders von dem feststehenden Gitterteil des Ruderstuhls oder des Rumpfes entkoppelt werden. Während die eine Seite der Knoten relativ zum Boot fixiert ist, gleitet die andere Seite an der Interfacefläche entlang und kann die Rotation des Ruders ausführen.

Die hier vorgestellte Methode eignet sich bei geschickter Wahl der Lage der Grenzfläche, um Ruderbewegungen an Unterseebooten im Rechenggebiet effektiv umzusetzen, da sie bei den begrenzten räumlichen Verhältnissen eingesetzt werden kann, ohne große Verfälschungen der Rudergeometrie hinnehmen zu müssen. Durch Testrechnungen mit unterschiedlichen Rudergeometrien wurde die Funktionalität mit und ohne Strömungsberechnung nachgewiesen, Abbildungen (45)-(51).

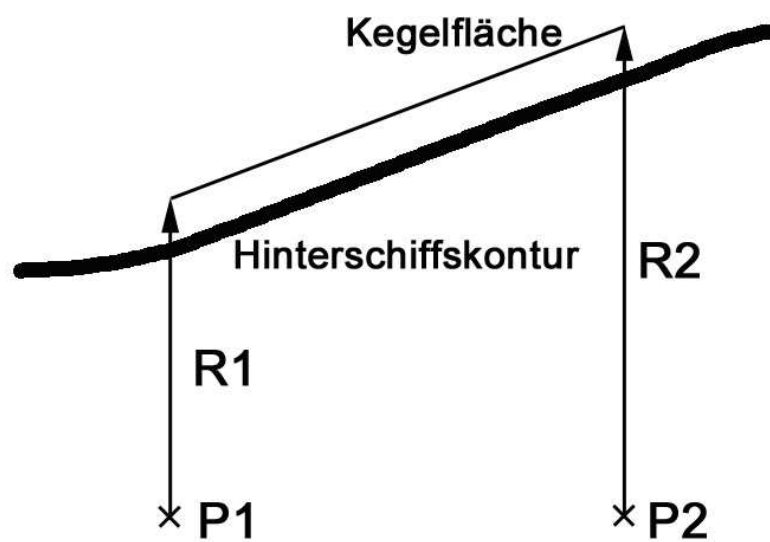


Abbildung 14: Bestimmung des Kegelsegmentes aus zwei Punkten und zwei Radien

4 Simulation der Bewegung bei vorgegebener Bahn

4.1 Einleitung

Die Durchführung von präzisen Manövern ist eine wichtige Voraussetzung für den sicheren Einsatz und Betrieb von U-Booten. In der Praxis hat sich gezeigt, daß es bei schnellen Auftauchmanövern von Unterseebooten zu einem unvorhergesehenen Bewegungsverhalten des Bootes kommen kann. Während der Aufstiegsphase von Notauftauchmanövern, bei denen die Ballasttanks mittels Gasgeneratoren schnell gelenzt werden, kam es in der Vergangenheit wiederholt zu starken Rollbewegungen.

Da die Berechnung der Auftauchmanöver auf Basis der hydrodynamischen Koeffizienten, die aus der Taylor-Reihen-Entwicklung der Bewegungsgleichungen gewonnen wurden, sich als nicht ausreichend erwiesen hat, wurde ein anderer Lösungsweg verfolgt. Zur Bestimmung der hydrodynamischen Kräfte und Momente, die auf das Boot und dessen Anhänge wirken, wurde ein dreidimensionales instationäres Rechenverfahren eingesetzt, welches die Viskosität und die Turbulenz im Fluid berücksichtigt. Da die Ergebnisse stark von der Reynoldszahl abhängig sind, werden alle Druck und Geschwindigkeitsverläufe für die Großausführung ermittelt. Die Bestimmung dieser Werte mittels viskoser Berechnung ist besonders für die Großausführung mit Anhängen sehr komplex und beansprucht viel Rechenzeit, aber die gewünschte Genauigkeit erfordert diesen Aufwand. Durch die instationäre Betrachtungsweise ist es möglich, nicht nur die örtlichen, sondern auch die zeitlichen Kraftverläufe an einem Boot zu ermitteln.

4.2 Simulation eines Notauftauchmanövers

Das Manövrieren von U-Booten stellt einen zeitlich instationären Vorgang dar, dessen numerische Untersuchung sehr komplex ist. Ein Ziel des in Zusammenarbeit mit der HDW entstandenen Vorhabens war die Entwicklung eines Verfahrens zur Simulation von U-Bootbewegungen am Rechner mit Hilfe eines vorhandenen Programmpaketes zur Lösung von instationären, viskosen Strömungsproblemen. Von besonderem Interesse ist dabei das Verhalten eines U-Bootes während eines Notauftauchmanövers. In der Vergan-

genheit durchgeführte Versuche mit der Großausführung und im Modellmaßstab zeigten starke Rollinstabilität unterschiedlichster Bootsgeometrien.

Für die Simulation des Auftauchmanövers wurde die Geometrie eines Bootes als CAD-Modell erstellt, mit der die Simulation am Rechner durchgeführt wurde, Abbildungen (52), (53).

Die bei den Großausführungsversuchen entstandenen Meßdaten für den Bahnverlauf wurden dem IST zur Verfügung gestellt. Die Meßdaten wurden aufbereitet und in translatorische und rotatorische Bewegungskomponenten des Bootes zerlegt. Darauf aufbauend wurde ein für die Gitterbewegung geeignetes Gitterkonzept erstellt, um die komplexe Bootsbewegung im Rechengebiet umzusetzen.

Die Funktionalität der Gitterbewegung wurde bei Rechnungen mit Testgeometrien belegt, Abbildungen (54)- (57). Für die ersten Testberechnungen wurde eine rotationssymmetrische Geometrie verwendet, die in einer quaderförmigen Domain vernetzt wurde. Die schrittweise Erhöhung der Freiheitsgrade der Bootsbewegung wurde mit Testrechnungen erprobt. Dabei wurden zuerst die translatorischen Bewegungen realisiert und nach erfolgreichem Test die rotatorischen Bewegungen einbezogen. Die Geometrie wurde durch ein entgegen der X-Richtung strömendes Fluid bewegt, so daß die Relativgeschwindigkeit zwischen Testkörper und Fluid den Vorgaben entsprach. Die für eine stabile Strömungsberechnung erforderliche Gitterqualität wurde zu jedem Zeitschritt eingehalten.

Die Proberechnungen mit der realen Bootsgeometrie zeigten die Grenzen der verwendeten Gitterbewegung auf. Besonders die Rotationsbewegung um die Bootslängsachse führte zu verzerrten Gitterelementen die zu einem Abbruch der Berechnungen führten, so daß das Konzept für die Simulation der Bewegung überarbeitet werden mußte, Abbildungen (58). Das aus den Ergebnissen der verwendeten Bewegungskonzepte entwickelte Modell erfüllt die gewünschten Anforderungen und läßt eine dreidimensionale Bewegung der komplexen Bootsgeometrie im Raum zu. Die Steuerung der Bewegung erfolgt über eine Eingabedatei.

Durch Proberechnungen wurde die Funktionalität der Gitterbewegung nachgewiesen, und sinnvolle Zeitschrittgrößen wurden ermittelt.

4.2.1 Analyse der Bewegungsdaten

Im Jahr 1992 wurden Notaufauchmanöver mit einem U-Boot im Skagerrak durchgeführt. Dabei stieg das Boot durch Lenzen mehrerer Tauchzellen mittels Gasgeneratoren aus einer Tiefe von über 50 Metern auf. Die Bewegungen des U-Bootes wiesen starke translatorische Bewegungen in horizontaler und vertikaler Richtung auf. Die Bewegungen in Querrichtung wurden bei den Messungen nicht erfaßt. Neben den translatorischen Bewegungen traten große Rollwinkel um die Bootslängsachse, sowie große Trimmwinkel auf. Der Gierwinkel wurde ebenfalls nicht erfaßt. Das Manöver dauerte über 30 Sekunden bis zum Durchbrechen der Wasseroberfläche.

Während die aufgenommenen Meßwerte im globalen Koordinatensystem in bezug auf die translatorische Bewegung und den Trimmwinkel angegeben werden, werden die Rotationen um die Mittschiffsachse in ein bootsfestes Koordinatensystem umgerechnet. Dies ergibt für die horizontale Bewegung eine Strecke von mehr als hundert Metern und eine vertikale Strecke von unter hundert Metern. Die Winkel für die Rollbewegung liegen vom Betrag höher als 20 Grad zu jeder Seite und für den Trimmwinkel zwischen -10 und +25 Grad.

4.2.2 Realisierung der Bootsbewegung im Rechengitter

Die Schräganströmung des Rumpfes verursacht ein großes weitreichendes Nachstromfeld, was bei der Berechnung der viskosen Umströmung einen großen Abstand des Bootes vom Rand des Rechengebietes erfordert. Dieser Abstand ist notwendig, damit Druckgradienten in axialer Richtung hinter dem Boot bis zur Begrenzung des Rechengebietes abgebaut werden.

Die durch die Zerlegung in eine vertikale und eine horizontale Geschwindigkeitskomponente der Vorausgeschwindigkeit des Bootes entstandene horizontale Geschwindigkeitskomponente, weist zeitlich nur leichte Änderungen auf, so daß eine gemittelte horizontale Geschwindigkeit \bar{u} sinnvoll errechnet werden kann.

$$u_t = \bar{u} + \delta u \quad (4.1)$$

$$\delta u < \bar{u} \quad (4.2)$$

Diese mittlere Anströmgeschwindigkeit des Bootes in horizontaler Richtung kann zu einer Reduzierung der notwendigen Gitterbewegung in dieser Richtung genutzt werden. Die vertikale Geschwindigkeitskomponente weist starke Änderungen sowohl im Betrag als auch in der Richtung auf, so daß keine sinnvolle Anströmgeschwindigkeit und damit eine Verringerung der Gitterbewegung erzielt werden kann.

$$w_t = \bar{w} + \delta w \quad (4.3)$$

$$\delta w > \bar{w} \quad (4.4)$$

Mit dem bereits oben ausführlich beschriebenen Prinzip der Gitterverzerrung konnten die translatorischen Bewegungen erfolgreich umgesetzt werden, was in zahlreichen Testrechnungen bewiesen wurde. Durch die Verwendung einer mittleren Anströmgeschwindigkeit konnte die Bewegung in horizontaler Richtung reduziert werden. Auch die Vertrimmung wurde erfolgreich umgesetzt und getestet. Bei der Realisierung der Rollbewegung stieß das verwendete Konzept an seine Grenzen. Während Rollwinkel bis 20 Grad mit ausreichender Gitterqualität berechnet wurden, konnten größere Rollwinkel in beide Richtungen nicht durch die Gitterverzerrung bei gleichzeitiger Bewegung des Bootes umgesetzt werden. Ab einem gewissen Winkel traten in dem verzerrten Netz negative Volumina auf, so daß die Rechnung abbrach, Abbildung (58). Für die Umsetzung der geforderten Bewegung mußte ein anderes Verfahren gefunden werden.

Mit den Erkenntnissen aus den Testrechnungen wurde eine neue Methode entwickelt, die auf die Gitterverzerrung verzichtet. Das bereits oben beschriebene Verfahren verzerrt nicht mehr das Gitter, sondern die Bootsgeometrie wird durch ein bewegtes Gitter

entsprechend der Lage zum Bezugspunkt bewegt. Bei diesem Verfahren bleibt die Gitterqualität zu jedem Zeitpunkt gleich, da innerhalb des Gitters keine Verschiebung erfolgt. Die vorgegebene Bahnkurve, mit großen translatorischen Verschiebungen und großen Rollwinkeln um die Bootslängsachse, konnte mit dieser Variante im Rechnermodell simuliert werden.

4.2.3 Generierung der Bahndaten

Die von der HDW bereitgestellten Meßdaten über den Auftauchvorgang sind eine Kombination aus verschiedenen Bewegungen. Für die Simulation wurden diese Bahndaten in horizontale und vertikale Anteile zerlegt, um so die weitere Verarbeitung zu erleichtern. Die horizontale Geschwindigkeit u wurde aus der Voraugeschwindigkeit U_{Log} des Bootes ermittelt. Da kein Gierwinkel gemessen wurde, ergibt sich für die horizontale Geschwindigkeit des Bootes die Gleichung (4.5). Die vertikale Geschwindigkeit w wurde über die Tiefenänderung dh pro Zeitschritt dt ermittelt (4.6).

$$u = U_{Log} \cdot \cos \alpha \quad (4.5)$$

$$w = \frac{dh}{dt} \quad (4.6)$$

Der Trimmwinkel sowie der Rollwinkel des Bootes wurden direkt übernommen, da diese im bootsfesten Bezugssystem vorlagen. Der seitliche Versatz und damit die Quergeschwindigkeit v wurden nicht aufgezeichnet und nicht in der Berechnung berücksichtigt. Die umgerechneten Bewegungsdaten wurden in einer Tabelle zusammengestellt. Diese Tabellendaten werden von einer „Junction Box Routine“ in CFX aufgerufen und eingelesen. Damit stehen sie dem Berechnungsprogramm im „Memory-Managementsystem“ zur Verfügung, so daß die Routinen, die die Bewegung steuern, auf diese Daten zugreifen können.

Die für die Bahnberechnung notwendigen Daten werden in einer Tabelle für jeden Zeitschritt erfaßt und zu Beginn der Rechnung in das Memory-Managementsystem geladen.

Tabelle 4.1: Aufbau der Tabelle

Zeit [s]	pitch [°]	roll [°]	yaw [°]	Weg X [m]	Weg Y [m]	Weg Z [m]
...

4.2.4 Berechnung mit einer Bootsgeometrie

Nachdem die Methodik zur Realisierung der Bootsbewegung mit einfachen Geometrien umgesetzt wurde, konnte eine komplexere Bootsgeometrie mit Anhängen für die Berechnung verwendet werden. Die Bootsgeometrie wurde in einer kugelförmigen Domain mit ca. $3,5 \cdot 10^6$ Zellen vernetzt. Die Kugel hat einen Durchmesser von 700 m mit der Bootsgeometrie im Zentrum, Abbildung (59).

Der Nullpunkt in der Ausgangslage entspricht dem Gewichtsschwerpunkt des Bootes. Die Berechnungen wurden mit einer Zeitschrittgröße von 0,05 Sekunden durchgeführt. Die Randbedingungen wurden wie bereits oben beschrieben gesetzt, so daß sich die Anströmung infolge der Bootsbewegung ergibt. Als Diskretisierungsschema wurde „High Resolution“ gewählt, um Konvektionsflüsse so genau wie möglich zu berechnen und gleichzeitig die numerische Stabilität der Rechnung nicht zu gefährden. Als Turbulenzmodell wurde das SST-Modell verwendet, welches in Wandnähe das $k - \omega$ Turbulenzmodell benutzt und im Fernfeld auf das $k - \epsilon$ Modell umschaltet.

Die Bewegung des Rechengitters mit der Bootsgeometrie durch das stehende Fluid bewirkt eine Störung der Flüssigkeit in Bootsnähe, Abbildung (60), (61). Die gesamte Dauer des Auftauchvorganges konnte durch diese Methode mit gleichbleibender Gitterqualität und Strömung simuliert werden.

Für die Auswertung der Rechenergebnisse sind besonders die auf das Boot wirkenden Kräfte und die um die Schiffslängsachse wirkenden Drehmomente im zeitlichen Verlauf von großer Bedeutung. Die Auswertung auf den einzelnen Oberflächensegmente des Bootes gestattet es, die wirkenden Kräfte und Momente detaillierter zu lokalisieren und zu analysieren, Abbildung (62).

Bei der Berechnung wurde ein Vorlauf als Geradeausfahrt von einigen Sekunden generiert, so daß die tatsächlichen Strömungsbedingungen zu Beginn des eigentlichen Manövers besser wiedergegeben werden konnten. Die benutzte Version der Berechnung verwendet User Fortran Routinen, die während der Berechnung aufgerufen werden und mit Hilfe der Drücke und der Schubspannungen am Boot die Kräfte und Momente im bootfesten Koordinatensystem berechnen. Diese Werte können während der Berechnung als Monitor Point grafisch angezeigt und anschließend in einer Datei gespeichert werden. Dadurch wird die Auswertung erheblich beschleunigt, und die Anfälligkeit für Fehler nimmt ab.

Die Anzahl der „Coefficient-Loops“ pro Iterationsschritt wurde mit 80 als Maximum und 4 als Minimum festgesetzt.

4.2.5 Bewertung der Ergebnisse

Die Berechnung mit dem oben vorgestellten Verfahren zur Simulation der Bootsbewegung hat sich bewährt. Durch geschickte Wahl der Randbedingungen ist es möglich, die Bewegung eines Körpers in einem stehenden Fluid zu simulieren. Im gesamten Rechengebiet ist die Strömungsgeschwindigkeit Null, und nur das sich bewegende Boot bewirkt eine Störung des Fluids, Abbildung (61). Die gesamte Dauer des Auftauchvorganges konnte so simuliert werden.

Die auf die verschiedenen Bereiche der Bootsoberfläche wirkenden Kräfte und Momente, wurden zusammengefaßt, um die Diagramme übersichtlicher zu gestalten. Entscheidend dabei ist der Ort und der Zeitpunkt, an dem die Kräfte am Rumpf ein Rollmoment bewirken.

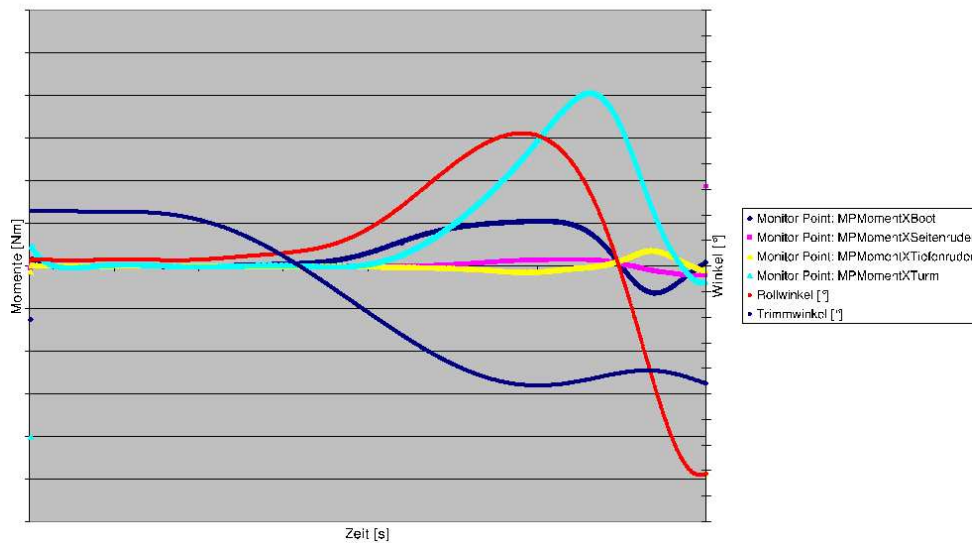


Abbildung 15: Momentenverlauf um die Bootsängsachse

Der überarbeitete Bahnverlauf mit einer Vorlaufzeit ermöglicht die Startbedingungen besser an die realen Bedingungen anzupassen und einen stetigen Bahnverlauf zu simulieren. Nach wenigen Zeitschritten hat sich die Strömung um den Rumpf ausgebildet, so daß zu Beginn des eigentlichen Manövers keine weiteren Störungen auftreten. Während des Vorlaufs bewegt sich das Boot für einige Sekunden, mit ca. 10 Grad vorlastigem Trimm, auf einer nach unten gerichteten Geraden.

Nach ca. 37 % der Simulationszeit beginnt sich ein Drehmoment um die Schiffslängsachse aufzubauen, Abbildung (15). Durch die Unterteilung des Rumpfes in verschiedene Abschnitte konnte die Kraftwirkung im vorderen Rumpfbereich lokalisiert werden. Die Momente resultieren aus der unterschiedlichen Druckverteilung im Vorschiffsbereich. Es ist deutlich zu erkennen, daß auf der Backbordseite ein langgestrecktes Unterdruckfeld entstanden ist, Abbildung (64), während auf der Steuerbordseite nur ein sehr kleiner Unterdruckbereich vorhanden ist, Abbildung (63).

Nach ca. 13 % der Simulationszeit sind die Druckverteilungen noch symmetrisch und nur

im vorderen Bereich vorhanden, Abbildung (65).

Das Unterdruckgebiet am oberen Radius des vorderen Decks entsteht aufgrund einer Geschwindigkeitszunahme der vertikalen Geschwindigkeitskomponente in diesem Bereich. Während auf der Steuerbordseite die Strömung nach oben gerichtet ist, wird die Strömung auf der Backbordseite nach unten beschleunigt, wodurch sich das Drehmoment ergibt, das eine Krängung in Richtung Backbord verursacht, Abbildungen (66), (67).

Der auf beiden Seiten am Bug vorhandene kleine Unterdruckbereich bildet sich durch die Geschwindigkeitsüberhöhung, die hinter dem Staupunkt am Bug entsteht.

Das Unterdruckgebiet am vorderen Rumpf oben bildet sich im Verlauf des Auftauchmanövers weiter aus, Abbildung (68), bis es ab der Hälfte der Simulationszeit nicht mehr stark variiert. Ab diesem Zeitpunkt beginnt sich die Druckverteilung am unteren Rumpf zu verändern, Abbildung (69), (70), (71).

Am vorderen Oberdeck des Rumpfes auf der Steuerbordseite bildet sich nach ca. 32 % der Simulationszeit ein langgezogenes Unterdruckgebiet aus, Abbildung 72, so daß ab diesem Zeitpunkt eine unsymmetrische Strömung am Rumpf auftreten muß. Die unsymmetrischen Kräfte greifen zunächst im vorderen Bereich des Rumpfes oben an, so daß eine unsymmetrische Momentenverteilung ab diesem Zeitpunkt dort festzustellen ist. Dieses Unterdruckgebiet nimmt stetig zu, während sich gleichzeitig am Turm ein Unterdruckgebiet aufbaut, Abbildung (73), (74), (75), (76).

Die Staupunkte am Rumpf und am Turm wandern leicht auf die Backbordseite aus, so daß das krängende Moment verstärkt wird, Abbildung (80). Während das Unterdruckgebiet am Rumpf, räumlich fest, nur den Betrag ändert, dehnt sich das Unterdruckgebiet am Turm stetig aus. Der stärkste Unterdruckbereich befindet sich kurz hinter der Turmvorderkante. Ein weiteres starkes Unterdruckgebiet entsteht an der oberen Kante des Turms, Abbildung (74). Nach Erreichen des maximalen Ausschlags nimmt der Druck auf der Steuerbordseite wieder zu, jedoch wirkt der Turm dämpfend, Abbildung (77) - (79).

Nach ca. 27 % der Simulationszeit beginnt ein Drehmoment am Rumpf zu wirken, das nach ca. 65 % der Simulationszeit einen Wert von mehreren hundert kNm erreicht und nur noch geringfügig ansteigt. Nach ca. 50 % der Simulationszeit greift ein schnell wachsendes Drehmoment am Turm an, welches nach ca. 80 % der Simulationszeit den vierfachen Wert des Drehmoments des Rumpfes erreicht. Nach ca. 62 % der Simulationszeit überschreitet das Drehmoment, das durch den Turm verursacht wird, das Drehmoment am Rumpf.

Die Momente, die auf die Seiten- und Tiefenruder wirken, heben sich größtenteils auf. Das Drehmoment am Rumpf erreicht nach ca. 75 % der Simulationszeit sein Maximum und fällt anschließend ab. Das Moment am Turm erreicht nach ca. 82 % der Simulationszeit seinen Maximalwert, bevor es abfällt, Abbildung (15).

Durch die Kraftverläufe für die Y- und Z-Richtung im bootsfesten Koordinatensystem, entsteht erwartungsgemäß ein zeitlicher nicht linearer Rollmomentenverlauf. Während die Kraft in Z-Richtung bereits nach ca. 18 % der Simulationszeit auftritt und bis ca. 65 % der Simulationszeit etwa linear ansteigt, setzt die Querkraft erst nach ca. 42 % der Simulationszeit ein und erreicht nach ca. 76 % der Simulationszeit einen mehr als doppelt so hohen Wert. Ab diesem Punkt nimmt die Querkraft schnell ab. Die vertikale Kraft steigt bis ca. 80 % der Simulationszeit an und beginnt dann langsam abzunehmen, Abbildung (16). Ein Großteil der Querkraft entsteht aufgrund der starken Rollwinkel und der aufwärtsgerichteten Bewegung des Bootes.

Während des Umschlagens des Bootes von der Steuerbord- auf die Backbordseite, bewirkt der Turm eine Dämpfung der Bewegung. Jedoch bildet sich nach Überschreiten der Nullage ebenfalls ein Unterdruckgebiet aus, Abbildungen (81) - (83).

Der Vergleich zwischen den hydrodynamischen Momenten, die mit Hilfe des Verfahrens nach Bohlmann ermittelt wurden und den Ergebnissen der CFD Berechnung zeigt leicht unterschiedliche Verläufe für die Momente, die auf das Boot wirken. Die Kurve der durch die viskose, instationäre Rechnung ermittelten Werte steigt zeitlich versetzt und steiler an, als die Kurve der von Bohlmann berechneten Momente. Das Maximum erreicht die

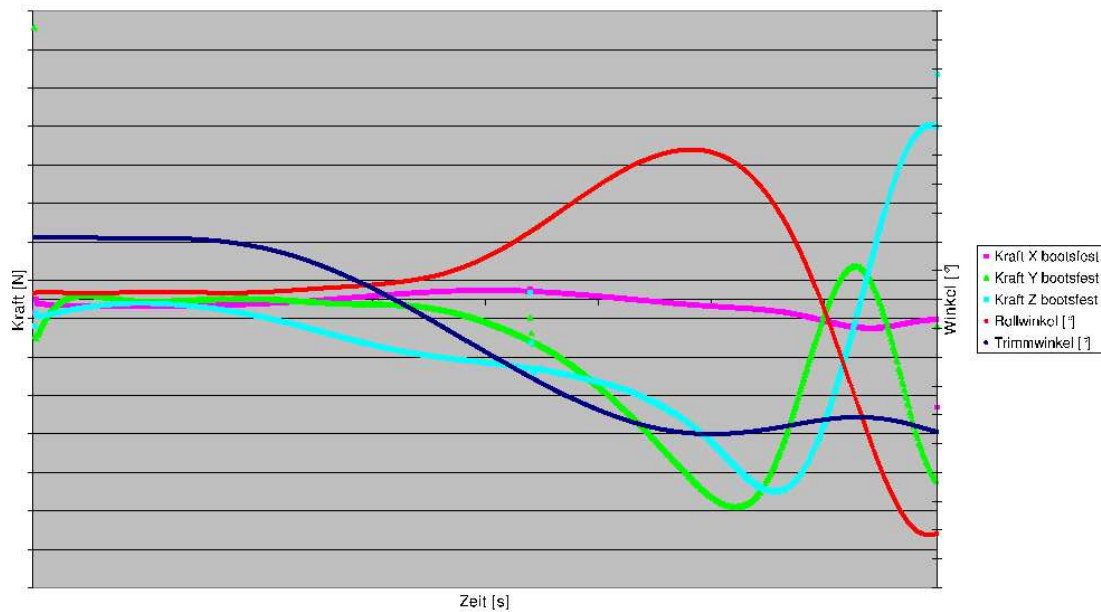


Abbildung 16: Verlauf der Kräfte, die auf das Boot wirken.

Kurve nach ca. 80 % der Simulationszeit. Die Kurve der von Bohlmann ermittelten Momente erreicht ihr Maximum bereits nach ca. 70 % der Simulationszeit. Während der Maximalwert dieser Kurve bei mehreren hundert kNm liegt, erreicht das Moment der Berechnung mit dem viskosen Rechenverfahren einen Wert, der ca. 60 % höher liegt. Beide Kurven fallen nach Erreichen des Maximalwertes steil ab, Abbildung (17).

4.2.6 Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf die Rollbewegung

Die Rechenergebnisse zeigen, daß sich das am vorderen Rumpf angreifende Moment nach ungefähr 25 % der Simulationszeit unsymmetrisch ausbildet. Zu diesem Zeitpunkt hat der Bootskörper bereits eine Krängung von wenigen Grad. Diese Auslenkung kann aufgrund des vorhergehenden Manövers oder eines ungleichmäßigen Anblasens der Tauchzellen

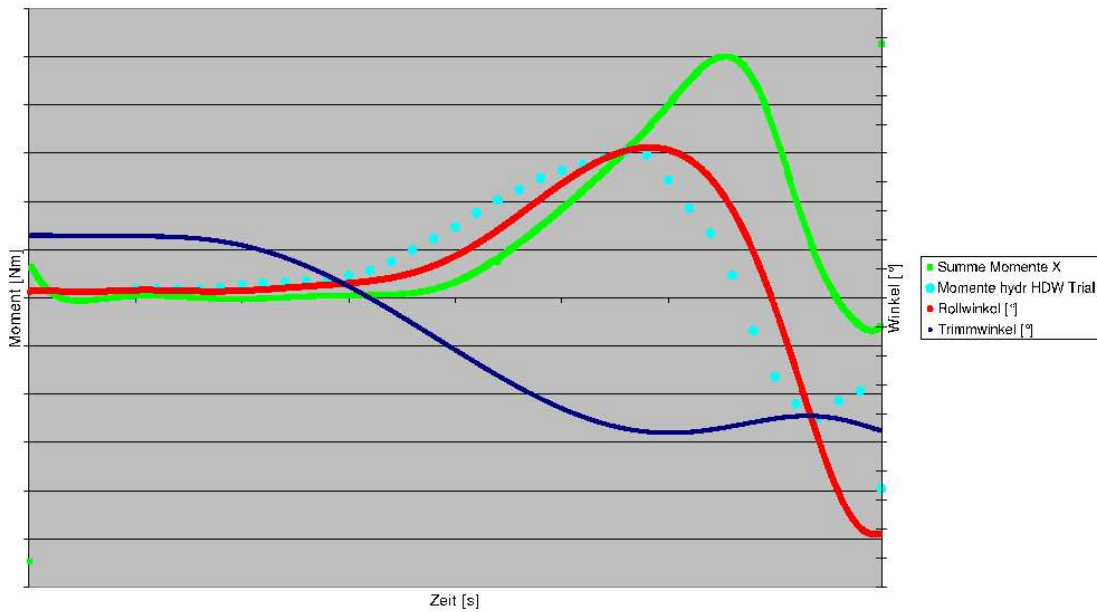


Abbildung 17: Momentenverlauf um die Bootsängsachse

entstanden sein. In Verbindung mit der vertikalen Anströmung durch die Auftauchbewegung, die kurz vorher einsetzt, ergibt sich ein Unterdruckgebiet am Boot. Somit scheint der vordere Bereich des Rumpfes, bei vertikaler Anströmung von oben, wie ein Tragflügelprofil zu wirken. Diese Geometrie führt zu einer Überhöhung der Geschwindigkeit auf der einen Seite des Rumpfes und bewirkt ein einseitiges Unterdruckgebiet.

Durch das Unterdruckgebiet vergrößert sich der Rollwinkel, und das Drehmoment nimmt stetig zu. Nach ungefähr 48 % der Simulationszeit beginnt am Turm ebenfalls ein Drehmoment um die Schiffsängsachse zu wirken, welches die Rollbewegung verstärkt. Während das Moment, das am Rumpf angreift, nach 62 % der Simulationszeit relativ konstant bleibt, steigt das Moment am Turm kontinuierlich bis 75 % der Simulationszeit an.

Zu diesem Zeitpunkt beginnt die Rollbewegung sich umzukehren. Eine Erklärung ist, daß zu diesem Zeitpunkt die Strömung um den Rumpf und um den Turm keinen Auftrieb mehr liefert. Der Rollwinkel beträgt zu diesem Zeitpunkt über 20 Grad. Das große

statische aufrichtende Moment, welches sich zu diesem Zeitpunkt aufgebaut hat, bewirkt ein Umschlagen des Rumpfes. Während des Zurückdrehens des Bootes wirkt der Turm dämpfend, dagegen erzeugen die am Rumpf wirkenden Kräfte unmittelbar nach Überschreiten der Nullage ein auslenkendes Moment.

4.2.7 Zusammenfassung der Untersuchung

Das Strömungsfeld, welches sich um manövrierende U-Boote bildet, unterliegt zeitlichen Druck- und Kraftschwankungen. Die auf den Bootskörper wirkenden Kräfte beeinflussen den Bahnverlauf des Bootes.

Das entwickelte Berechnungsverfahren ermöglicht die Berechnung der Druck- und Geschwindigkeitsverteilung am U-Boot, während des Nachfahrens einer vorgegebenen Bahn. Dabei wurde das U-Boot als Starrkörpermodell behandelt, dies bedeutet, daß die Bewegung und der Einfluß der Seiten- und Tiefenruder vernachlässigt wurden. Der Bahnverlauf wird zuvor in Großausführungs- oder Modellversuchen ermittelt. Die Genauigkeit der bei diesen Versuchen gewonnenen Daten unterliegt der Genauigkeit der Meßmethoden und der Erfassung der Versuchsbedingungen.

Die Rechenergebnisse zeigen, daß die Ursache für den Beginn der Rollbewegung die Umströmung des Rumpfes ist. Das bedeutet, daß die Rumpfform mit dem aufgesetzten Deck annähernd ein Tragflügelprofil bildet, welches durch die vertikale Anströmung Auftrieb für das Drehmoment um die Längsachse liefert. Eine geringere vertikale Anströmgeschwindigkeit würde das Rollmoment verringern, diese läßt sich jedoch nicht immer einstellen, da gerade bei Notauftauchmanövern eine aktive Steuerung mit Rudern oder Ballasttanks nicht gewährleistet werden kann. Aus den gleichen Gründen scheidet eine Beeinflussung des Aufstiegswinkels des Bootes und damit die Änderung des Anström winkels des Rumpfes für die Lösung des Problems aus. Eine Formänderung des Bootsquerschnitts, die die Tragflügelwirkung reduziert, könnte die Rollbewegung verringern, da durch diese Maßnahme die Querkraft am Rumpf verkleinert werden kann. Die Integration des Decks in die Zylindergeometrie des Bootskörpers könnte die Empfindlichkeit des Rumpfes in bezug auf die Entstehung einer asymmetrischen Druckverteilung beim Notauftauchmanöver deutlich reduzieren. Dabei sollte der Übergang gut straken

und ohne starke Krümmung erfolgen, da die Kantenumströmung zu Unterdruckgebieten führt.

4.3 Bootsbewegung mit Propellereinfluß

4.3.1 Einleitung

Die Umströmung von Unterseebooten und Unterwasserfahrzeugen unterscheidet sich während eines Manövers wesentlich von der Umströmung bei Geradeausfahrt, Abbildungen (84),(85). Die Rechenergebnisse der viskosen Umströmung geben Einblicke in die komplexen instationären Strömungsverhältnisse um ein manövrierendes Fahrzeug. Durch das Nachfahren einer vorgegebenen Bahn kann nahezu jedes Manöver simuliert werden. In dieser Untersuchung wurde die Umströmung eines Unterseebootes während eines Manövers mit einer realen Unterseebootsgeometrie unter Berücksichtigung des Propellereinflusses berechnet. Die Auswertung der Berechnungsergebnisse gibt Aufschluß über die Druck- und Kräfteverteilung auf der Außenhaut, sowie über die Strömung am und hinter dem bewegten Boot. Dies ermöglicht, bereits in der Entwurfsphase Aussagen über Einflüsse veränderter Geometrien am manövrierenden Boot zu tätigen.

Die Berücksichtigung des Propellereinflusses ermöglicht eine genaue Betrachtung der Umströmung im Hinterschiffsbereich des Bootskörpers [2]. Da die Berechnung der Umströmung des drehenden Propellers mit Hilfe eines bewegten Netzes einen für Manövrieruntersuchungen nicht vertretbaren Rechenaufwand bedeutet, wird bei den vorliegenden Untersuchungen der Propellereinfluß durch ein mathematisches Modell in der Berechnung berücksichtigt.

4.3.2 Berücksichtigung des Propellereinflusses durch Integration des Propellermodells

Die Berücksichtigung des Propellereinflusses auf die Strömung erfolgt durch die Einbindung eines Propellermodells, welches am IST entwickelt wurde [42]. Dafür wird anstelle des rotierenden Propellers ein Zylinder ähnlichen Ausmaßes angeordnet, in dem das Propellermodell zur Anwendung kommt. Dieser Zylinder besitzt am Ort der Nabe eine Aussparung. Die Bewegungen des Zylinders sind an die Bootsbewegung gekoppelt. Dafür wird die Lage des lokalen Koordinatensystems für jeden Zeitschritt anhand von zwei bootsfesten Punkten in der Propellerdrehachse analog zur Bootsbewegung berechnet. Diese zwei Punkte definieren die x-Achse des lokalen Koordinatensystems für das Propellermodell. Das lokale Koordinatensystem dient zur Bestimmung der Koordinaten aller Elemente im Propellermodellbereich, in denen ein Schubereich und eine Einleseebene definiert werden. Während der Schubberechnung wird jedem Element im Schubereich ein Element in der Einleseebene zugeordnet. Dies geschieht durch die Bestimmung des lokalen Anströmgeschwindigkeitsvektors. Mit den Daten des Propellerfreifahrt diagrams wird aufgrund des durchschnittlichen lokalen Zustromgeschwindigkeitsvektors der Betriebspunkt des zu ersetzenden Propellers bestimmt. Bei der Berechnung werden sowohl die axialen, als auch die tangentialen Geschwindigkeitsvektoren berücksichtigt. Die Zustromgeschwindigkeit wird um die induzierte Geschwindigkeit reduziert. Das Propellermodell berücksichtigt die Relativgeschwindigkeiten im lokalen Koordinatensystem zur Berechnung des Schubes. Diese setzen sich aus den Absolutgeschwindigkeiten des Fluids und den aus der Bootsbewegung resultierenden Geschwindigkeiten zusammen. Die Bestimmung der Drehzahl des Propellers n erfolgt über die Berücksichtigung der durchschnittlichen tangentialen Zustromgeschwindigkeit V_{tan} . Die Bestimmung des Betriebspunktes erlaubt es, daß zu jedem Zeitschritt Drehzahl, Schub und Drehmoment unter Berücksichtigung des aktuellen Zustroms zum Propellermodell berechnet werden. Die Ermittlung des Schub- und Momentenbeitrags dT und dQ eines jeden Elementes im Schubereich des Propellermodells, erfolgt entsprechend Abbildung (18) durch die Bestimmung des lokalen Geschwindigkeitsvektors. Dazu dient jeweils die Geometrie des Profils des Propellerflügelschnittes auf dem lokalen Radius [24].

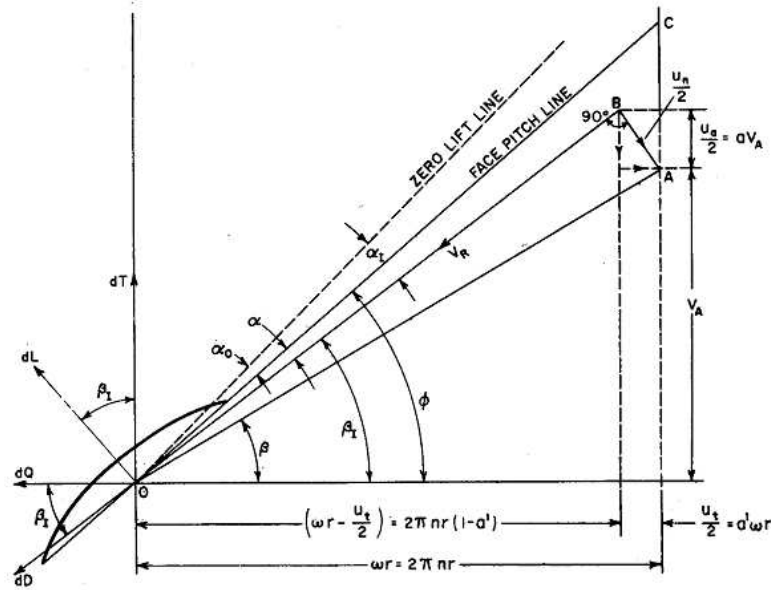


Fig. 11 Blade velocity diagram

Abbildung 18: Blade Velocity Diagram [43]

V_A = lokale axiale Anströmgeschwindigkeitskomponente

U_a, U_t = induzierte Anströmgeschwindigkeitskomponente in axialer und tangentialer Richtung

ϕ = geometrischer Steigungswinkel des Propellers

α = effektiver Anströmwinkel

α_0 = Null-Auftriebswinkel

β = Fortschrittswinkel

β_i = Anströmwinkel unter Berücksichtigung der induzierten Geschwindigkeitskomponenten

d_L = Auftriebskraft eines Zylinderschnittelementes d

d_T = Schubkraft eines Zylinderschnittelementes d

d_Q = Drehmoment eines Zylinderschnittelementes d

Zur Berechnung des Auftriebs- und Widerstandsbeiwertes C_L und C_D jedes einzelnen Propellerflügelschnittes, wird die Flügelgeometrie des durch das Propellermodell ersetzten Propellers berücksichtigt, dabei werden die Profillänge c , die Steigung ϕ , der Skew, die maximaler Dicke t_{max} und die Wölbung f_{max} herangezogen. Mit Hilfe des Auftriebs-

beiwertes C_L und des Widerstandsbeiwertes C_D werden der lokale Schub T_{loc} und das lokale Drehmoment Q_{loc} jedes Elementes berechnet:

$$C_L = 2 \cdot \pi \cdot (\alpha - \alpha_0) \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} C_D = & 0.0675 + 1255.0 \cdot t_{max}^2 \cdot f_{max}^2 \\ & - 3.839 \cdot f_{max} \cdot \alpha + 9.658 \cdot \alpha^2 \\ & - 17.101 \cdot t_{max} \cdot \alpha^2 \\ & - 1616.0 \cdot t_{max}^2 \cdot \alpha^2 \cdot \alpha^2 \\ & - 5802.0 \cdot t_{max}^3 \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$T_{loc} = \rho \cdot \frac{c \cdot V_A^2}{D} \cdot (C_L \cdot \cos\beta_i - C_D \cdot \sin\beta_i) \quad (4.9)$$

$$Q_{loc} = \rho \cdot \frac{r \cdot c \cdot V_A^2}{D} \cdot (C_L \cdot \sin\beta_i - C_D \cdot \cos\beta_i) \quad (4.10)$$

Basierend auf der Formel von Kruppa [3] wird zur Berechnung des Schubbeiwertes eine modifizierte Formel verwendet (4.8). Um im Schubbereich des Propellermodells die gewünschten Größen für den Schub und das Drehmoment zu erreichen, wird durch Integration der Schub- und Momentenbeiträge über das Volumen des Schubbereichs je ein Faktor berechnet, die für den zugehörigen Betriebspunkt ermittelt wurden. Diese werden während der Iteration bei jedem Zeitschritt angepaßt.

Das hier beschriebene Verfahren erlaubt eine realitätsnahe Simulation des Propellereinflusses während der Simulation einer Bootsbewegung.

Der Einfluß wird besonders im Hinterschiffsbereich deutlich, wo sich wesentliche Unterschiede in der Druckverteilung gegenüber einer Simulation ohne Propellermodell ergeben.

4.3.3 Beispielrechnung

Anhand der sehr komplexen Geometrie eines Bootes der Klasse 212 wurden die hier vorgestellten Berechnungen durchgeführt, Abbildung (86). Für die Berechnung wurde ein blockstrukturiertes Hexaedergitter erstellt. Die Bootsgeometrie wurde in einer kugelförmigen Domain mit ca. 3,5 Mio. Elementen vernetzt. Die Domain besitzt einen Durchmesser von 900 Metern, so daß der Abstand der Geometrie von den Rändern des Berechnungsgebietes ausreichend groß ist, um Störeinflüsse der Geometrie an den Rändern zu unterbinden.

Das berechnete Manöver hat eine Dauer von 32 Sekunden. Das Manöver beginnt mit einer Geradeausfahrt von 10 Sekunden und einem anschließenden Einfahren in den Drehkreis von 22 Sekunden Dauer. Dabei dreht das Boot um ca. 70 Grad nach Backbord, Abbildung (20). Das Boot bewegt sich in dieser Zeit um ca. 160 Meter in Vorausrichtung und um ca. 40 Meter in Querrichtung. Die Tiefenänderung beträgt wenige Meter. Während des Drehkreises krängt das Boot um wenige Grad nach innen. Dieses Verhalten ist für Unterseeboote typisch, da diese gewichtsstabil sind und die Zentrifugalkräfte tief im Boot angreifen, im Gegensatz zu Überwasserschiffen, welche im Drehkreis durch den hochliegenden Gewichtsschwerpunkt und die tief angreifenden hydrodynamischen Kräfte nach außen krängen.

Während der instationären Berechnung simuliert das Propellermodell die Wirkung des Propellers bei einer konstanten vorgegebenen Drehzahl des Propellers.

4.3.4 Geradeausfahrt

Während der Vorausrichtung bildet sich um den Bootskörper eine nahezu symmetrische Strömung aus. Die Strömung wird lediglich im Hinterschiffsbereich durch die Auswirkungen des Propellerdralls leicht beeinflusst. Dabei treten infolge der Drehrichtung des virtuellen Propellers unsymmetrische Geschwindigkeitsverteilungen auf, die leichte Druckunterschiede auf den Ruderflächen bewirken, Abbildung (87)-(89). Der übrige Bootskörper wird während der Vorausrichtung symmetrisch umströmt, so daß auch die Druck- und Ge-

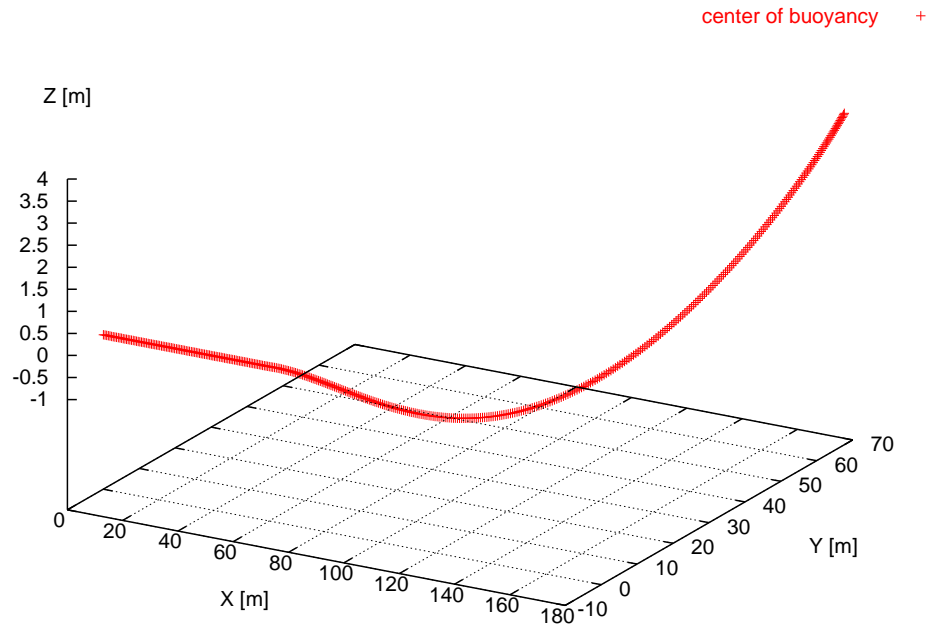


Abbildung 19: Bahndaten des Verdrängungsschwerpunktes

schwindigkeitsverteilung am Rumpf symmetrisch erfolgt.

Die bereits beschriebene Vorgehensweise der Strömungsberechnung mit einem bewegten Rechengitter durch ein ruhendes Fluid beeinflusst auch die Auswertung der Ergebnisse. Während bei der klassischen Berechnungsmethode, bei der ein ruhender Körper von einem bewegten Fluid umströmt wird, die Absolutgeschwindigkeit des Fluids gleich der Relativgeschwindigkeit zum Körper ist, gilt dies bei der hier verwendeten Methode nicht mehr. Da das Fluid zunächst in Ruhelage ist und nur durch die Störung der bewegten Geometrie beeinflusst wird, ist im Fernfeld die Absolutgeschwindigkeit gleich Null und die Relativgeschwindigkeit zum Boot am höchsten. Dieser Effekt wird in den Abbildungen (90) bis (99) verdeutlicht.

Dabei ist zu beachten, daß die Farbgebung der Geschwindigkeit nicht der Geschwindigkeit unmittelbar auf der Außenhaut entspricht, sondern einen berechneten Wert in Wandnähe wiedergibt, da ansonsten die Fluidgeschwindigkeit durch die Haftbedingung gleich

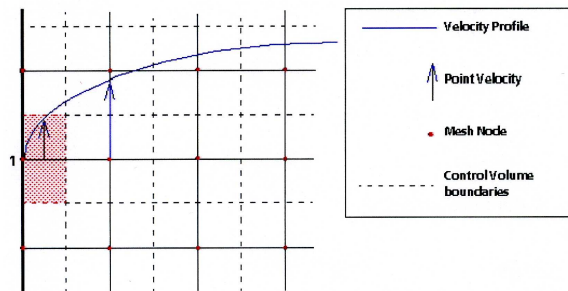


Abbildung 20: Bestimmung der Geschwindigkeit in Wandnähe [15]

der Wandgeschwindigkeit ist. Der Gleichungslöser verwendet Finite-Volumen die nicht identisch mit den Gitterelementen sind. Sondern die Knoten der Gitterelemente liegen in der Mitte eines Finiten-Volumen-Elementes. Daraus ergibt sich, daß beispielsweise die berechnete Variable der Strömungsgeschwindigkeit eines Knotens auf einer Wand nicht präzise Null ist. In diesem Fall basiert die berechnete Geschwindigkeit an einem Knoten aus dem Mittelwert der Geschwindigkeit der umgebenden Kontrollvolumina wodurch sich eine von Null verschiedene Geschwindigkeit relativ zur Wand ergibt. So kann sichergestellt werden, daß beispielsweise die Massenerhaltung für die betroffenen Volumen-Elemente erfüllt wird. Im Postprocessing kann wahlweise die konservative Darstellung gewählt werden oder eine Darstellung, bei der die Knoteninformationen mit den Werten die sich aus der Haftbedingung ergeben überschrieben werden (hybride Darstellung). Da jedoch die konservative Darstellung Informationen über die Geschwindigkeitsverteilung in Wandnähe gibt wird diese hier favorisiert.

Die Farbgebung richtet sich nach der Skala der relativen oder absoluten Geschwindigkeit. In den Abbildungen (90) bis (99) ist auf der linken Seite die Umströmung des Bootes mit der Färbung nach der Absolutgeschwindigkeit und auf der rechten Seite die entsprechende Färbung mit der Relativgeschwindigkeit dargestellt. Die Absolutgeschwindigkeit ist an den Staupunkten der Geometrie am größten. Dort bewegt sich das Fluid mit Bootsgeschwindigkeit. Besonders am Bug und an der Vorderkante des Turms ist dies an den roten Bereichen zu erkennen. Relativ zum Boot bewegt sich das Fluid gerade an den Staupunkten am langsamsten, weswegen diese Stellen bei der inversen Skala blau dargestellt

sind. Hinter den Staupunkten sind in der absoluten Darstellung die blau dargestellten Bereiche zu erkennen, die eine Verzögerung des Fluids bedeuten. Dies bedeutet, daß in den blauen Bereichen das Fluid langsamer strömt als sich das Boot durch das Wasser bewegt und somit die Relativgeschwindigkeit ansteigt. In der inversen Darstellung ist dies verdeutlicht. Die Bereiche der höheren Relativgeschwindigkeit sind rot eingefärbt. Die Unterschiede der Darstellungsweisen werden besonders im Vergleich der Abbildungen (94),(95) und (98),(99) deutlich.

Im weiteren Text wird die inverse Darstellung verwendet, damit für den Betrachter der Zusammenhang nach Bernoulli einfacher ersichtlich ist, - d.h., daß am Ort hoher Strömungsgeschwindigkeit v der Druck p absinkt und am Ort niedriger Strömungsgeschwindigkeit der Druck ansteigt.

Bereich hoher Strömungsgeschwindigkeit = rote Einfärbung

Bereich niedriger Strömungsgeschwindigkeit = blaue Einfärbung

Bereich hohen Druckes = rote Einfärbung

Bereich niedrigen Druckes = blaue Einfärbung

Bei der Betrachtung der auf die Außenhaut wirkenden Drücke bei Geradeausfahrt zeigt sich am Bug der Überdruckbereich um den Staupunkt, Abbildungen (100),(101),(102). Dort bewegt sich das Fluid mit der Bootsgeschwindigkeit mit, so daß es relativ zum Boot betrachtet ruht, Abbildung (99). Dieser Überdruckbereich wird horizontal und vertikal unterschiedlich stark in Abhängigkeit von der Krümmung des Rumpfes im Vorschiffbereich abgebaut. Seitlich und unterhalb vom Bug wechselt der Druck, durch die beschleunigte Strömung an der Krümmung, auf wenigen Metern vom Überdruckgebiet in ein Unterdruckgebiet, Abbildung (102). Im Übergangsbereich zum Oberdeck ist aufgrund des kleineren Krümmungsradius die Beschleunigung der Strömung geringer, so daß sowohl der Druckgradient, als auch der Betrag des Druckes kleiner sind als im seitlichen Bereich. Wenige Meter hinter dem Bug sind die Druckgradienten im Vorschiffsbereich an der Außenhaut deutlich kleiner geworden.

Der Wechsel des Druckes vom Überdruckbereich in den Unterdruckbereich ist neben dem Bugbereich auch an den anderen Anhängen und Anbauten hinter einem Staupunkt zu er-

kennen, Abbildungen (103)-(105). Die Verläufe der Druck- und Geschwindigkeitsgradienten sind jeweils vom Übergang des Anbauteils zum Rumpf abhängig. Große Krümmungsradien und kleine Einlaufwinkel reduzieren den Druckgradienten, da hier der Druckausgleich über eine größere Fläche erfolgen kann.

Neben dem Bugbereich ist der Turm ein weiterer markanter Staupunkt, da dieser nahezu senkrecht in der Strömung steht, Abbildungen (103). Da hinter dem Staupunkt durch den relativ kleinen Krümmungsradius die Strömung stark beschleunigt wird, bildet die Strömung seitlich des Turms ein Unterdruckgebiet aus. Durch die Anordnung der vorderen Tiefenruder im seitlichen Turmbereich, kann die Überhöhung der Fluidgeschwindigkeit für eine bessere Ruderwirkung ausgenutzt werden, Abbildung (106). Da die Auftriebskraft eines angeströmten Profils mit dem Quadrat der Anströmgeschwindigkeit zunimmt, läßt sich die Wirksamkeit der Tiefenruder durch die gezielte Platzierung in dem Bereich der überhöhten Strömungsgeschwindigkeiten effektiv steigern.

Die strakenden Übergänge vom Rumpf in den Turm und die Vermeidung von Kanten führen zu geringen Druck- und Geschwindigkeitsgradienten in diesen Übergangsbereichen. Der bei älteren Booten mit weniger strakenden Übergängen entstehende Turmwirbel, der an der Turmvorderkante entsteht und sich seitlich des Turms fortpflanzt, wird weitestgehend unterdrückt, Abbildung (107). Die sich zum Turmende verjüngende Gestaltung des Turms bewirkt eine gleichmäßige Verteilung des Druckanstiegs über die Turmfläche bis zur Hinterkante. Vom Unterdruckbereich an den vorderen Tiefenrudern bis zur Turmhinterkante nimmt die Relativgeschwindigkeit zum Boot kontinuierlich ab und der Druck auf die Außenhaut steigt an, so daß an der Turmhinterkante ein Überdruckbereich entsteht, Abbildungen (103).

Im Bereich der hinteren Schulter des Rumpfes treten ebenfalls Übergeschwindigkeiten auf, die zu einer Druckreduzierung führen, Abbildungen (104),(105),(96),(97). Diese Bereiche sind symmetrisch auf der Backbord- und Steuerbordseite zu erkennen. Während auf der Bootsunterseite nur eine leichte Geschwindigkeitsüberhöhung erfolgt, bildet sich im Bereich vom Oberdeck durch die dort vorhandene stärkere Krümmung ein größerer Geschwindigkeitsgradient aus.

Durch die Rumpfseitensonare (Flank Array Sonar) entstehen bei Voraussfahrt um die Wölbung der Außenhaut Gebiete leicht erhöhten Drucks, und die Geschwindigkeit relativ zum Rumpf in der Kante nimmt ab, Abbildung(100),(95). Der gleiche Effekt des Druck-

anstiegs läßt sich am Übergang vom Oberdeck zum Druckkörper beobachten, da auch hier das Wasser durch die Kante relativ zum Boot langsamer strömt, Abbildung(106).

4.3.5 Kreisfahrt

Mit dem Übergang von der Vorausfahrt in die Kreisfahrt verändert sich auch die Umströmung der Bootsgeometrie, Abbildungen (107), (108). Kurz nach dem Andrehen in den Drehkreis nach Backbord wird der Bootskörper unsymmetrisch angeströmt. Mit zunehmender Dauer des Bootsmanövers und damit des Driftwinkels steigt die Asymmetrie der Umströmung an, bis das Boot die stationäre Drehkreisfahrt erreicht, Abbildungen (108). Mit der veränderten Anströmung des Rumpfes, verändern sich auch die Druckverhältnisse auf der Außenhaut des Unterseebootes.

Die zunächst leichte unsymmetrische Anströmung des Rumpfes führt zu einem leicht ausermittigten Staupunkt am Bug, Abbildung (110), (111). Die leichte Schräganströmung des Bootes bewirkt am Bug auf der Steuerbordseite eine Erhöhung der Umströmungsgeschwindigkeit. Durch die unsymmetrische Anströmung verringert sich das Unterdruckgebiet auf der Backbordseite, und gleichzeitig vergrößert sich der Unterdruckbereich auf der Steuerbordseite des Bootes, da auf der Steuerbordseite die Strömung durch den vergrößerten Krümmungsradius stärker beschleunigt wird als auf der Backbordseite, Abbildungen (125),(126). Im Bereich des Mittelschiffes steigt auf der Steuerbordseite der Druck bedingt durch die Drift des Bootes an, dementsprechend nimmt der Druck auf der Drehkreisinnenseite leicht ab.

Die Druckdifferenzen zwischen der Backbord- und der Steuerbordseite nehmen im Verlauf des Drehkreismanövers weiter zu, Abbildungen (112)-(119). Dadurch bilden sich im Bug- und Heckbereich der Steuerbordseite Unterdruckgebiete aus, während sich dazwischen im Mittelschiffsbereich das Überdruckgebiet verstärkt. Auf der Backbordseite bildet sich zwischen den Überdruckgebieten im Bug- und Heckbereich ein langgestrecktes Gebiet geringen Druckes aus, Abbildungen (120)-(121). Die resultierende hydrodynamische Querkraft der auf den Rumpf wirkenden Kräfte zeigt zur Kreisinnenseite und wirkt

somit der Zentrifugalkraft des fahrenden Bootes entgegen.

Während im Bugbereich der Druckpunkt durch die Schräganströmung leicht nach Backbord versetzt ist, wandert der Staudruckpunkt am Turm, durch die Lage des Pivot-Points im Bugbereich und der damit verbundenen Anströmung, leicht nach Steuerbord aus, Abbildungen (122). Dies führt zu einem Unterdruckgebiet auf der Backbordseite des Turmaufbaus, während auf der Steuerbordseite durch die geringere Relativgeschwindigkeit zwischen Boot und Fluid ein Druckanstieg festzustellen ist, Abbildungen (123)-(126). Die unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten der Ruder auf der Steuerbord- und Backbordseite des Turms führen zu einer unterschiedlichen Rudereffektivität der Turmtiefenruder während des Drehkreises. Durch die höhere Anströmgeschwindigkeit auf der Backbordseite des Turms können durch Ruderlegen dort höhere Auftriebskräfte erzielt werden als auf der Steuerbordseite des Turms.

Im Heckbereich bilden sich während der Drehkreisfahrt durch die Kantenumströmung an der Ober- und Unterseite des sich verjüngenden Bootskörpers auf der Steuerbordseite Unterdruckgebiete aus. Das Überdruckgebiet auf der Backbordseite bildet sich dagegen mittig am Bootskörper aus, Abbildungen (120),(121).

Während der Drehkreisfahrt ändert sich die Druckverteilung am Rumpf, im Vergleich zur Geradeausfahrt des Bootes, und auch das Nachstromfeld des Unterseebootes wird stark beeinflusst, Abbildung (109). Dadurch ändert sich die Anströmung in der Propellerebene, Abbildung (127) . Die dadurch bei einem real existierenden Propeller auftretende inhomogene Schubverteilung wird auch vom Propellermodell berücksichtigt. In den Abbildungen (128) und (129) ist der Einfluß der Nachstromänderung auf das Propellermodell zu erkennen, das auf die inhomogene Anströmung mit einer inhomogenen Schubverteilung, wie der reale Propeller, reagiert. Während bei Geradeausfahrt eine nahezu homogene Schubverteilung über den Propellerquerschnitt stattfindet, ändert sich diese bei Kurvenfahrt.

Die während des Manövers auf den Rumpf wirkenden Druck und Scherkräfte sind in Abbildung (21) dargestellt. Die Werte sind im bootsfesten Koordinatensystem dargestellt

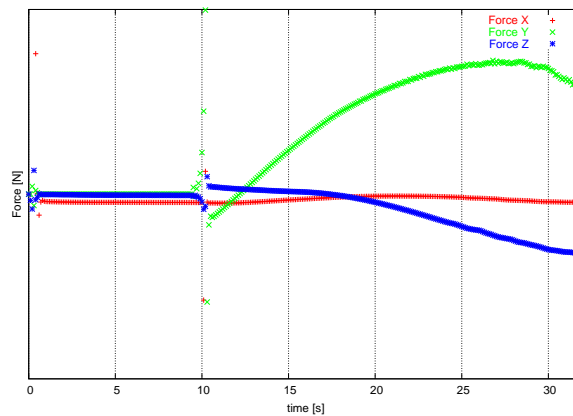


Abbildung 21: Auf das U-Boot wirkende Strömungskräfte

und sind über der Zeit aufgetragen. Die Abbildung verdeutlicht, wie sich die Kräfte auf das Boot mit Beginn der Kreisfahrt ändern. Während der Widerstand in x-Richtung durch die leicht reduzierte Vorausgeschwindigkeit nur sehr gering abnimmt, ist ein starker Anstieg der Querkraft zu erkennen, welche der Drift des Bootes entgegenwirkt. Das für die Drift notwendige Giermoment entsteht unter anderem aus den Druckdifferenzen im Heckbereich des Bootes, Abbildungen (119), (121). Besonders deutlich ist der Unterdruckbereich auf der Steuerbordseite des Bootes zu erkennen, während auf der Drehkreisinnenseite ein starkes Überdruckgebiet wirkt. Verstärkt wird das Drehmoment um die Hochachse durch das Überdruckgebiet vor dem Turm. Auch die Tiefenänderung des Bootes während des Manövers bewirkt eine entsprechende Gegenkraft, die im Diagramm dargestellt ist.

4.3.6 Zusammenfassung

Die Bewegungssimulation von Bootsgeometrien mit Anhängen und Propellerwirkung wird seit wenigen Jahren meistens für Geradeausfahrt oder für kurze Manöverabschnitte realisiert. Bei der hier vorgestellten Methode wird im Gegensatz zu anderen Methoden das gesamte Rechengebiet durch ein ruhendes Fluid bewegt. Dabei müssen während der Berechnung weder die Randbedingungen verändert, noch Gitterlinien in der Bootsdo-

main verzerrt werden, wodurch der Simulation weder zeitliche noch geometrische Grenzen gesetzt sind. In Kombination mit dem am IST entwickelten Propellermodell kann die Umströmung des Bootes bei beliebig komplizierten Manöverbahnverläufen und beliebiger -dauer unter Berücksichtigung der Wirkung des Propellereinflusses simuliert werden. Das hier vorgestellte Verfahren gibt dem Entwerfer Einblicke in die Druck- und Kräfteverteilung um das manövrierende Boot. Die durch die Berechnung gewonnenen Erkenntnisse kann der Konstrukteur nutzen, um z.B. Ruder oder Sensoren ideal am Rumpf zu platzieren oder die Belastungen auf einzelne Bauteile am Boot während eines Manövers zu untersuchen. Dabei hilft die Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung in Rumpfnähe, um beispielsweise die Tiefenruder in Bereichen erhöhter Geschwindigkeiten zu platzieren.

4.4 Beispielrechnung mit Rudereinfluß

Für einen weiteren Nachweis der Funktionalität der Gitterbewegung und der für die Berechnung erstellten Routinen an einer Unterseebootsgeometrie wurde eine Suboff-Geometrie verwendet, die mit vier beweglichen Rudern versehen ist. Das blockstrukturierte Hexaederrechnetz besteht aus ca. 2,2 Millionen Volumenelementen in sechs über Interfaces verbundenen Domains. Die größte Domain umgibt die Bootsgeometrie mit ca. 1,7 Mio. Hexaedern. Die kleinste Domain ist die zylindrische Propellerdomain, bestehend aus ungefähr 10.000 Volumenelementen. Jede der vier Ruderdomains ist mit ungefähr 100.000 Volumenelementen vernetzt, Abbildung (130),(131).

Für die Berechnung wurde eine Zeitschrittweite von 0,02 Sekunden gewählt. Die Berechnung wurde laminar durchgeführt, um die Anzahl der zu lösenden Gleichungen zu reduzieren und damit Rechenzeit zu sparen.

Für die Testrechnung wurde der Beginn eines Abtauchmanövers nachgerechnet. Dabei fährt das Boot zunächst ohne Ruderlage mit einer Geschwindigkeit von $1 \frac{m}{s}$ geradeaus, Abbildungen (132),(133). Innerhalb von 3 Sekunden werden die hinteren Tiefenruder auf 10 Grad angestellt. Währenddessen beginnt das Boot vorlastig zu vertrimmen und erreicht nach ungefähr 8 Sekunden einen Trimmwinkel von ca. 10 Grad, Abbildungen

(134),(135).

Die Testrechnung zeigt, daß die Integration der separaten Ruderdomains in eine bewegliche Bootsdomain erfolgreich durchgeführt wurde. Während des Nachfahrens der vorgegebenen Bahnkurve, wurden die hinteren Tiefenruder aus der Nullage auf 10 Grad angestellt.

5 Simulation der Freifahrt

5.1 Einleitung

Die bisher präsentierten Berechnungsergebnisse sind die Resultate instationärer RANSE-Berechnungen, bei denen das Boot auf eine Bahnkurve gezwungen wurde. Damit können Manöver nachgefahren und die dadurch resultierenden Kraft- und Momentenverläufe ermittelt werden, wie es bei der Berechnung des Auftauchmanövers geschehen ist. Das Berechnen erzwungener Bahnbewegungen ermöglicht die Untersuchung von hydrodynamischen Vorgängen an bewegten Körpern oder ermöglicht die Simulation von PMM (Planar Motion Mechanism) Versuchen, wie sie ansonsten in Versuchsanstalten experimentell durchgeführt werden.

Durch die Kopplung der RANSE-Berechnung mit der Lösung der Bewegungsgleichungen kann das Bewegungsverhalten von Unterwasserfahrzeugen bestimmt werden, welches sich als Resultat der wirkenden Kräfte und Momente am Körper ergibt. Dabei wurde zunächst die Ankopplung der Bewegungsgleichungen mit einer einfachen Testgeometrie untersucht, bevor komplexere Geometrien mit beweglichen Rudern realisiert wurden.

5.2 Beschleunigungsfahrt einer Testgeometrie

Zur Überprüfung der Funktionalität der Kopplung der Bewegungsgleichungen mit dem Programmpaket wurde eine einfache rotationssymmetrische Testgeometrie verwendet. Durch die Integration eines Propellermodells konnte die Schubwirkung eines Propellers simuliert werden. Dafür wurde am Ort des Propellers eine zylindrische Subdomain integriert, die unter Berücksichtigung des Nachstroms der Testgeometrie den vom Benutzer vorgegebenen Schub durch Quellterme erzeugt. Der vom Propellermodell vorgegebene Schub wird vom Gleichungslöser der Bewegungsgleichungen eingelesen und bei der Berechnung der Axialkräfte, die auf die Geometrie wirken, berücksichtigt.

Mit der Testgeometrie konnte erfolgreich eine Beschleunigungsfahrt durchgeführt werden. Dabei wurde der Körper von einer Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 1 \frac{m}{s}$ durch die Wirkung

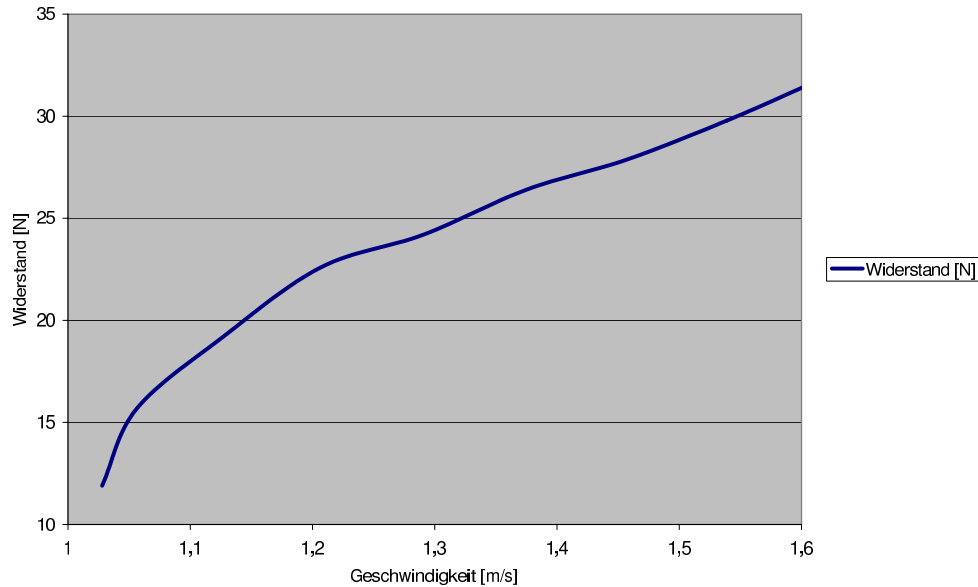


Abbildung 22: Widerstandskurve der Testgeometrie bei Beschleunigung

des Propellerschubes von ca. 240 N auf eine Geschwindigkeit $v_1 = 1.6 \frac{m}{s}$ beschleunigt. Während der Beschleunigungsfahrt wuchs der Widerstand der Testgeometrie von ca. 11 N auf über 31 N an. In Abbildung (22) ist der Verlauf der Widerstandskurve des Körpers über der Geschwindigkeit aufgetragen.

Das Rechengebiet der Testgeometrie wurde mit ca. 220.000 Elementen vernetzt, wobei ca. 4000 Elemente auf die Propellerdomain entfallen. Für die Begrenzung des kugelförmigen Rechengebietes wurde als Randbedingung eine offenen Randbedingung (Opening) gewählt und ein Umgebungsdruck von 0 Pa definiert. Die globale Geschwindigkeit am Opening wird mit $0 \frac{m}{s}$ vorgegeben, wodurch ein bewegter Körper in ruhendem Wasser simuliert wird, Abbildung (136). Die Testrechnung wurde in einem groben Rechengitter, laminar ohne Turbulenzmodell, durchgeführt, so daß die ermittelten Widerstände nur qualitativ zu bewerten sind, da der Widerstand zu gering ausfällt.

Nachdem sich das Strömungsfeld mit der vorgegebenen Startgeschwindigkeit um den

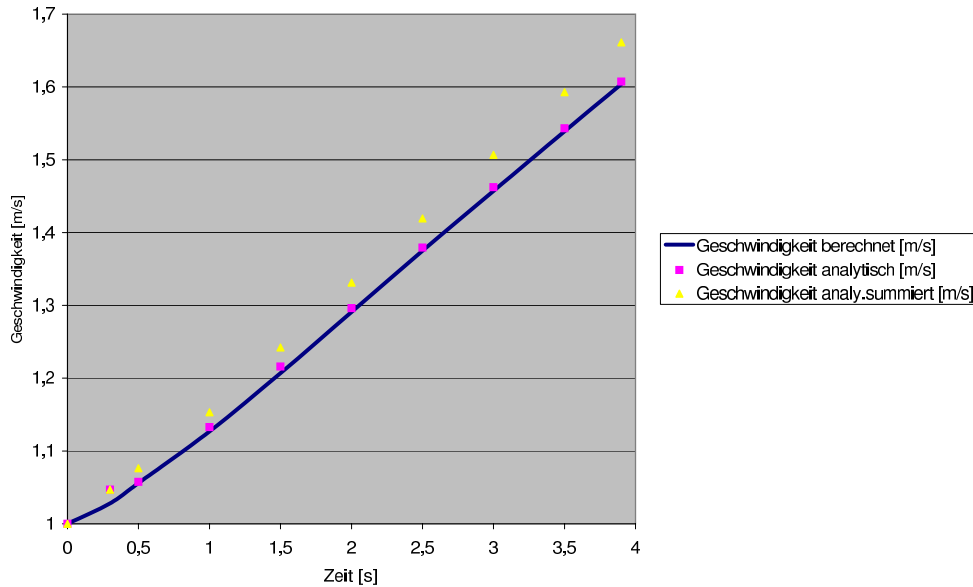


Abbildung 23: Vergleich der Geschwindigkeitsverläufe

Körper ausgebildet hat, beschleunigt das Propellermodell den Testkörper kontinuierlich weiter. Die Testrechnung bestätigt die erfolgreiche Kopplung der Bewegungsgleichungen mit dem RANSE-Löser, sowie die Anbindung des Propellermodells von Steden [24] an die Bewegungsgleichungen. Der Vergleich mit den analytisch ermittelten Geschwindigkeiten zeigt gute Übereinstimmungen. Dabei wurde als Ausgangsgeschwindigkeit für den nächsten Berechnungspunkt in Abbildung (23) einmal die Geschwindigkeit aus der RANSE-Berechnung und einmal der zuvor analytisch ermittelte Wert verwendet. Durch die Summation der Abweichungen nimmt die Gesamtabweichung mit fortschreitender Berechnungsdauer zu.

Die bei der Berechnung der Beschleunigung berücksichtigte hydrodynamische Masse wirkt bei der Bahnberechnung dämpfend, so daß die viskose Strömungsberechnung bei ausreichend kleinen Zeitschritten numerisch stabil durchgeführt werden kann. Die Geschwindigkeitszunahme hat Auswirkungen auf die Druckverteilung am Rumpf, was be-

sonders im Staupunkt am Bug und im Nachstrom des Bootes sichtbar wird, Abbildung (137), (138). Die stetige Beschleunigung der Testgeometrie führt zu ständig wechselnden Strömungsbedingungen in der Einleseebene des Propellermodells, so daß die Anzahl der inneren Schleifen zum Erzielen des Konvergenzkriteriums im Vergleich zu stationären Berechnungen ansteigt. Um die Anzahl der inneren Berechnungsdurchläufe möglichst gering zu halten, ist ebenfalls ein ausreichend kleiner Zeitschritt erforderlich. Der bei der Testrechnung verwendete Zeitschritt von 0,01 Sekunden genügt den Anforderungen für eine numerisch stabile Berechnung, erreichte aber auch zwischenzeitlich das Maximum für die Anzahl der inneren Berechnungsschleifen für das Propellermodell.

5.3 Z-Manöver mit einem Ellipsoid

Die Ergebnisse der durchgeführten Proberechnung mit einem frei fahrenden Körper zeigten, daß das Zusammenspiel der entwickelten Methoden funktioniert. Die Ergebnisse für die translatorische Bewegungskomponente in Vorausrichtung zeigten gute Übereinstimmungen. Proberechnungen zeigten, daß die Dämpfung durch die hydrodynamische Masse bei der Berechnung anderer Bewegungskomponenten den berechneten Bahnverlauf verfälschen kann. Um dies zu vermeiden, wurde das Berechnungsverfahren zum Lösen der Bewegungsgleichungen erweitert. Ziel war es durch eine modifizierte Berechnung die zur Stabilisierung der Berechnung notwendige hydrodynamische Masse A zu verringern, da diese physikalisch nicht notwendig ist. Die Kraftterme des mitbeschleunigten Wassers sind bereits in den instationären Strömungsgleichungen enthalten.

Um numerisch Instabilitäten bei der expliziten Kopplungsmethode zu reduzieren, wurde die neu berechnete Geschwindigkeit v^{n+1} aus der zuletzt berechneten Geschwindigkeit und der alten Geschwindigkeit v^n gemittelt.

$$v^{n+1} = \frac{1}{2}(v^{n+1} + v^n) \quad (5.1)$$

Dadurch wird die Auswirkung großer Beschleunigungsterme auf die Geschwindigkeits-

komponenten gedämpft, während bei konstanten Geschwindigkeiten keine Dämpfung erfolgt.

Wie Schneider [44] zeigt, sind explizite Kopplungsverfahren instabil, wenn die mitbeschleunigte Masse größer ist als die Masse des beschleunigten Körpers. Da die Beschleunigung unabhängig vom Zeitschritt ist [44], reicht die Reduktion der Zeitschrittweite nicht aus, um das Problem der Instabilität zu lösen.

Durch die Erweiterung um ein Produkt aus virtueller Masse m_{virt} und Beschleunigung auf beiden Seiten der Gleichung (5.2) ergibt sich eine modifizierte Form, wodurch die numerische Stabilität der Bewegungsgleichung erhöht werden kann.

$$\vec{F}_{flow} + \vec{F}_{extern} = m\dot{\vec{U}} \quad (5.2)$$

$$\vec{F}_{flow} + \vec{F}_{extern} + m_{virt} \cdot \dot{\vec{U}}_{old} = (m + m_{virt})\dot{\vec{U}} \quad (5.3)$$

Da die mitbeschleunigte Masse von der Geometrie des beschleunigten Körpers abhängig ist, kann sie je nach Bewegungsrichtung variieren. Der Einfluß der virtuellen Masse auf die berechneten Verschiebung ist relativ gering [44], so daß für eine Testrechnung mit einem Ellipsoid eine virtuelle Masse in der Größenordnung der verdrängten Masse des Körpers angenommen wurde.

Für die durchgeführten Testrechnungen wurde ein Ellipsoid von 4 m Länge und 1 m Durchmesser als Testgeometrie verwendet, Abbildung (24). Das Ellipsoid wurde mit einer Geschwindigkeit von $1ms^{-1}$ in Vorausrichtung gestartet. Auf das Ellipsoid wirkt eine Kraft in lokaler X-Richtung von 25 N, die dem Widerstand in Vorausrichtung entspricht und entgegenwirkt. Um ein Z-Manöver einzuleiten wird auf die Geometrie um die lokale Y-Achse ein Drehmoment von 275 Nm aufgebracht. Dieses Drehmoment ändert bei einem Trimmwinkel von 10 Grad die Richtung und wirkt entsprechend entgegengesetzt auf



Abbildung 24: Geometrie des Ellipsoids

den Körper. Ein erneuter Wechsel des Vorzeichens erfolgt bei einem Trimmwinkel von -10 Grad. Dieser Momentenverlauf wurde für die Dauer der Berechnung fortgesetzt, Abbildung (139).

Die Berechnung mit der virtuellen Masse entsprechend der Verdrängung des Körpers lief numerisch stabil bis zum Ende der Berechnungsdauer durch. Im Vergleich mit den analytischen Berechnungsergebnissen zeigen sich gute Übereinstimmungen. Für die Berechnung der neuen Position der Geometrie, wurde die Position des vorangegangenen Zeitschrittes der RANSE-Berechnung zugrundegelegt. Die nahezu deckungsgleichen Bahnverläufe in Vorausrichtung und die geringen Abweichungen beim Trimmwinkel und der Verschiebung in Z-Richtung zeigen, daß die virtuelle Masse den Bahnverlauf nur unwesentlich beeinflusst. Dies wurde durch eine weitere Berechnung mit einer verdoppelten virtuellen Masse bestätigt. Auch diese Bahnkurve weicht nur leicht von dem zuvor berechneten Bahnverlauf ab.

Die hier beschriebenen Modifikationen erlauben es, daß auf die Added Mass bei dieser Geometrie verzichtet werden kann und dennoch eine explizite Kopplung der Bewegungsgleichungen an den RANSE-Löser numerisch stabil erfolgen kann, solange die Zeitschrittweite ausreichend klein gewählt wird.

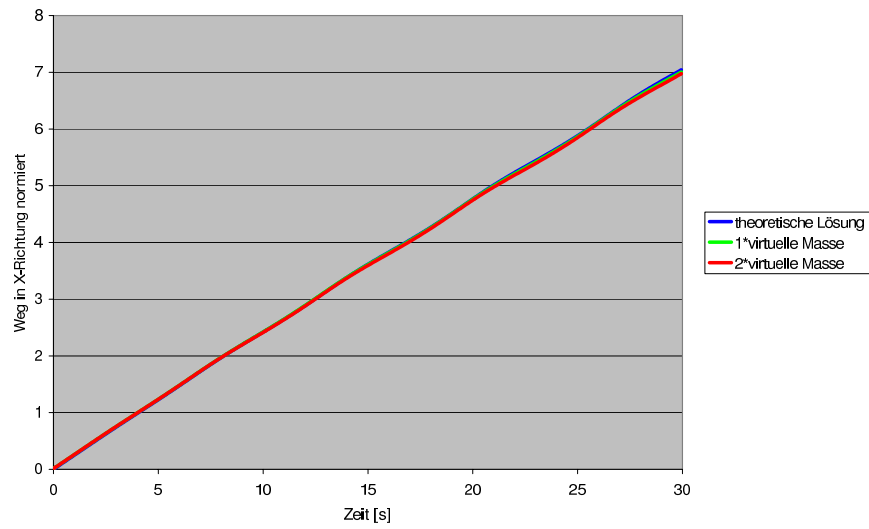


Abbildung 25: Normierte Wegstrecke in X-Richtung

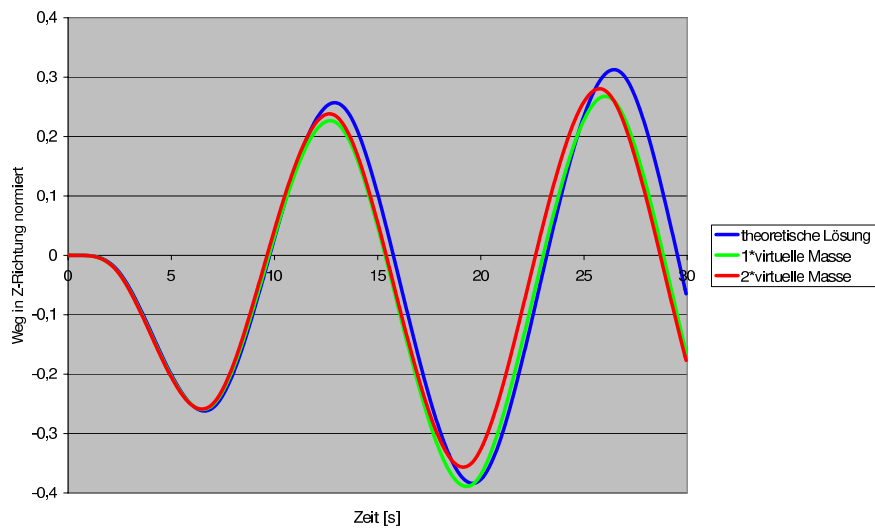


Abbildung 26: Normierte Wegstrecke in Z-Richtung

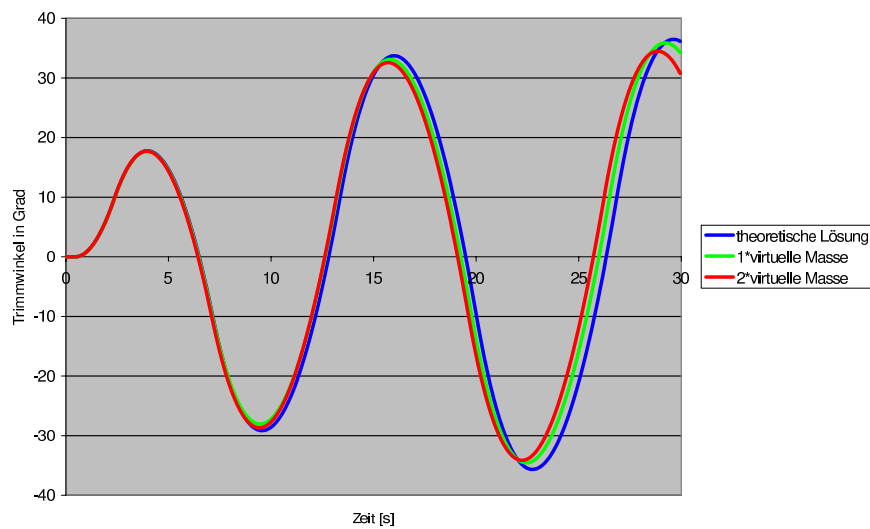


Abbildung 27: Trimmwinkel über der Zeit

5.4 Abtauchmanöver mit einer vereinfachten Suboff-Geometrie

Eine weitere Proberechnung wurde mit einer Suboff-Geometrie ohne Turm und Ruder durchgeführt. Dazu wurde diese mit 1 m/s Vorausgeschwindigkeit gestartet. Durch eine Kraftkomponente in Vorausrichtung wurde der Widerstand ausgeglichen.

In einer RANSE-Berechnung wurden an einer Suboff-Geometrie mit Turm und Anhängen die Ruderkräfte bei 10 Grad Ruderausschlag ermittelt und das dadurch entstehende Drehmoment auf die Bootsgeometrie berechnet.

Das so ermittelte Drehmoment wurde auf die vereinfachte Geometrie aufgebracht bis ein Trimmwinkel von 12 Grad überschritten wurde. Der Bahnverlauf der Testgeometrie verlief erwartungsgemäß, Abbildungen (28). Nach einer kurzen Geradeausfahrt beginnt die Geometrie zu vertrimmen, Abbildungen (140) - (141). Die entstehenden Kräfte bewirken ein Absinken des Bootes und eine erhöhte Drehgeschwindigkeit. Nach dem Wegfall des vorher aufgetragenen Trimmomentes verringert sich die Drehgeschwindigkeit, bis die Geometrie sich auf dem eingeschlagenen Kurs fortbewegt, Abbildungen (142) - (143). Auch diese Berechnung konnte ohne zusätzliche Added Mass numerisch stabil durchge-

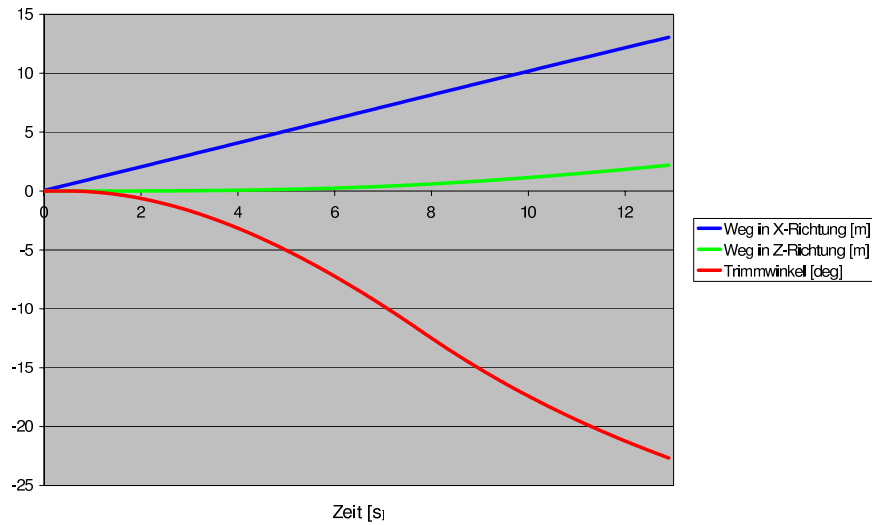


Abbildung 28: Bahnverlauf der vereinfachten Suboff-Geometrie

führt werden.

5.5 Bewegungssimulation mit einer Suboff-Geometrie

Nach erfolgreichem Nachrechnen einer Bahnkurve eines Tauchmanövers mit einer Suboff-Geometrie, wie es im vorherigen Kapitel beschrieben wurde, wurde die gleiche Geometrie mit demselben Rechengitter verwendet, um eine freifahrende Bewegung zu berechnen. Die 2,2 Millionen Hexaederelemente teilen sich, wie oben beschrieben, auf sechs unterschiedlich große Domains auf. Als Randbedingung wurde ein ruhendes Fluid angenommen, so daß ein bewegtes Boot in stehendem Wasser simuliert wurde. Die Strömungsrechnung wurde unter Verwendung des $k - \epsilon$ Turbulenzmodells durchgeführt.

Um das Risiko nicht konvergierender Lösungen pro Zeitschritt zu verringern, wurde die Zeitschrittweite auf 0,05 Sekunden gesetzt und die maximale Iterationsanzahl der inneren Schleife auf 40 erhöht. Als Konvergenzziel wurde als Mittelwert für die Residuen der

Strömungsgleichungen 10^{-5} und für die Residuen der Gitterverschiebung 10^{-8} m vorgegeben.

Die Bootsgeometrie bewegt sich zu Beginn mit $1 \frac{m}{s}$ für 0,5 Sekunden voraus, so daß die Zeitskala um 0,5 Sekunden von der Zeitskala der vorgegebenen Bahnkurve abweicht. Ebenso weicht die Verschiebung in X-Richtung um 0,5 m ab, also um die Verschiebung während der Vorlaufphase. Im Anschluß werden die Tiefenruder in drei Sekunden über die Steuerdatei auf 10 Grad ausgelenkt. In der Bewegungsgleichung wird ein konstanter Schub von 20 N über die Berechnungsdauer berücksichtigt, was geringfügig größer als der Widerstand bei Vorfahrt ist.

Die verwendete Geometrie besitzt eine angenommene Masse von 772 kg. Für die Trägheitsmomente wurden nachfolgende Werte verwendet: $I_{xx} = 24,4 \text{ kgm}^2$, $I_{yy} = 880 \text{ kgm}^2$, $I_{zz} = 880 \text{ kgm}^2$.

Die Anfangsgeschwindigkeit des Bootes wird durch die Wirkung der aufgebrachten Schubkraft beibehalten. Die Auslenkung der Tiefenruder wird erfolgreich durch das Gitterkonzept umgesetzt und bewirkt eine nach oben gerichtete Kraft und ein Drehmoment um die Y-Achse des Bootes. Das Boot reagiert auf das von den Rudern aufgebrachte Drehmoment und beginnt den Bug zu senken und das Heck anzuheben. Durch den Trimmwinkel entsteht am Bootskörper eine nach unten gerichtete Kraftkomponente. Diese Kraft steigt über die Dauer des Manövers stetig an. Durch den ansteigenden Trimmwinkel des Bootes bildet sich ein Unterdruckgebiet auf der Rumpfoberseite im Heckbereich des Bootes aus, Abbildung (144). Zusätzlich wandert der Staudruckpunkt am Bug durch die Drehbewegung leicht nach unten aus. Die aus der Bewegung des Bootes resultierende Geschwindigkeitsverteilung um den Rumpf ist in den Abbildungen (145)-(147) dargestellt.

Die hydrodynamischen Kräfte, die auf den Bootskörper wirken, führen zunächst zu einer relativ langsamen Bewegungsänderung, die durch das anwachsende Drehmoment beschleunigt wird. Die berechnete Bewegung spiegelt mit guter Übereinstimmung das erwartete Bewegungsverhalten der Testgeometrie wider. Im Vergleich zu den mit Bohl-

manns Verfahren errechneten Daten zeigen sich gute Übereinstimmungen, nur der Trimmwinkel um die Y-Achse in der Berechnung weicht leicht von den Ergebnissen der potentialtheoretischen Berechnung ab, Abbildungen (29), (30), (31). Um exaktere Berechnungsergebnisse zu erhalten ist eine Verfeinerung der Gitterauflösung in Wandnähe notwendig. Für eine Validierung der Ergebnisse, ist ein Vergleich mit den Ergebnissen aus Modellversuchen notwendig, da auch die potentialtheoretischen Berechnungsergebnisse Abweichungen zur Realität aufweisen können.

Bei dem verwendeten Parallelisierungsverfahren werden alle vorhandenen Rechendomains in die gleiche Anzahl an Partitionen unterteilt. Durch die sehr starken Unterschiede in der Domaingröße ist eine Parallelisierung bei dieser Art der Partitionierung nur begrenzt möglich, da ansonsten die kleinen Domains in zu kleine Partitionen aufgeteilt werden, was zu Instabilitäten bei der Berechnung führen kann. Aus diesem Grund wurde die Partitionierung auf neun Prozessoren eines PC-Clusters begrenzt. Bei einer Zeitschrittweite von 0,05 Sekunden ergibt sich für jede Sekunde Simulationszeit eine Rechendauer von ca. 2 Tagen. Die relativ kleine Zeitschrittweite ist notwendig, um eine konvergierende Lösung der inneren Berechnungsschleife zu erzielen. Besonders die hohen Druck- und Geschwindigkeitsgradienten an den Spalten zwischen Rumpf und Ruder erschweren das auskonvergieren der Lösungen. Hier scheint eine feinere zeitliche Auflösung notwendig zu sein, was jedoch wieder zu höheren Rechenzeiten führen wird. Die derzeit noch hohe Rechenzeit erlaubte nur wenige Berechnungen mit diesem Verfahren in einem angemessenen Zeitrahmen durchzuführen.

Aufgrund der hohen Rechenzeit läßt sich mit dem verwendeten Parallelisierungs- und Partitionierungsverfahren und den derzeit am Institut für Schiffstechnik und Transportsystem verfügbaren Rechnerkapazitäten nur ein prinzipieller Funktionsnachweis erbringen. Die erzielten Ergebnisse zeigen bisher richtige Tendenzen und gute Übereinstimmungen bezüglich Bahnverlauf und Trimmwinkel. Eine umfassende Validierung der Rechenergebnisse erfordert weitere Forschungsarbeiten, wozu auch die Beschleunigung der Berechnung durch weiterentwickelte Partitionierungsverfahren zählt.

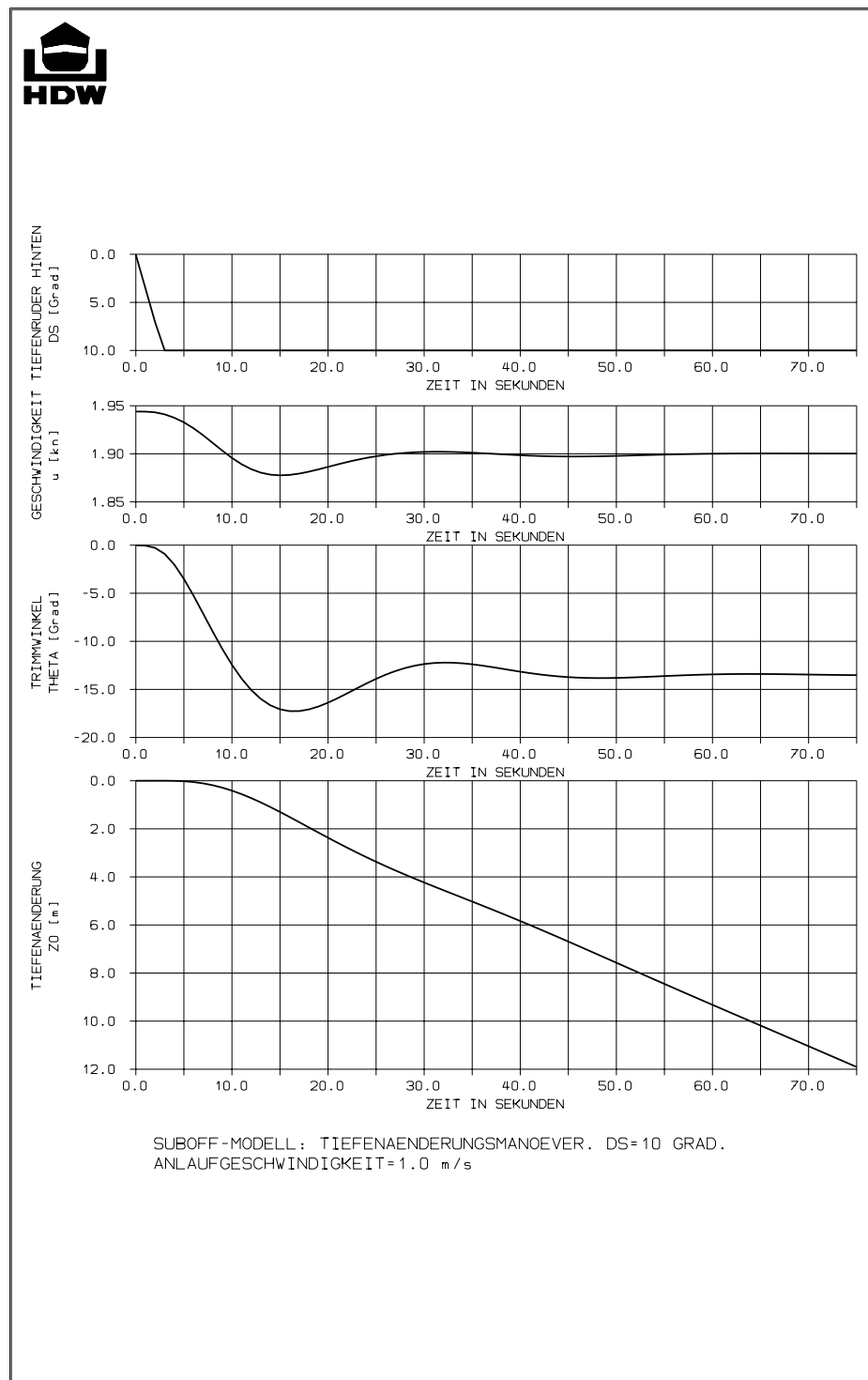


Abbildung 29: Bahndaten nach Bohlmann

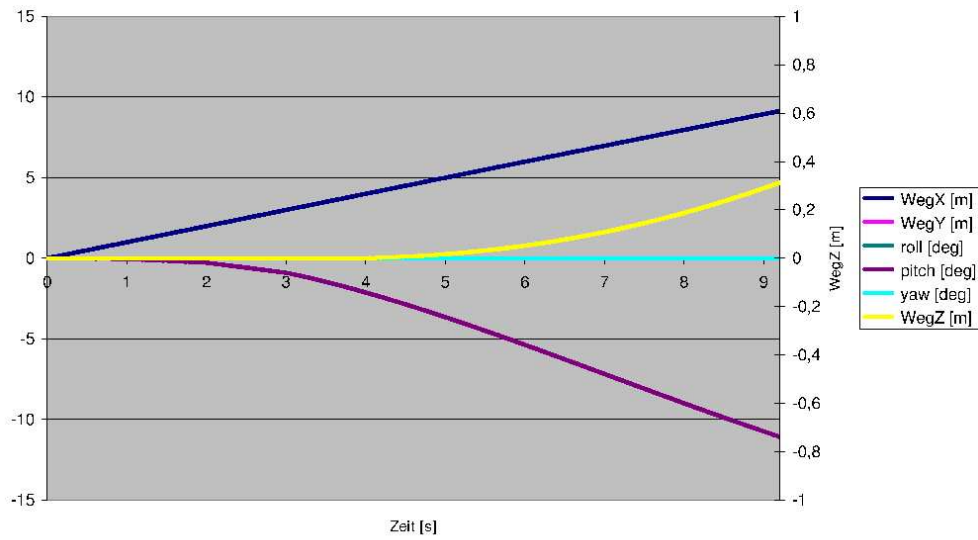


Abbildung 30: Vorgegebene Bahndaten

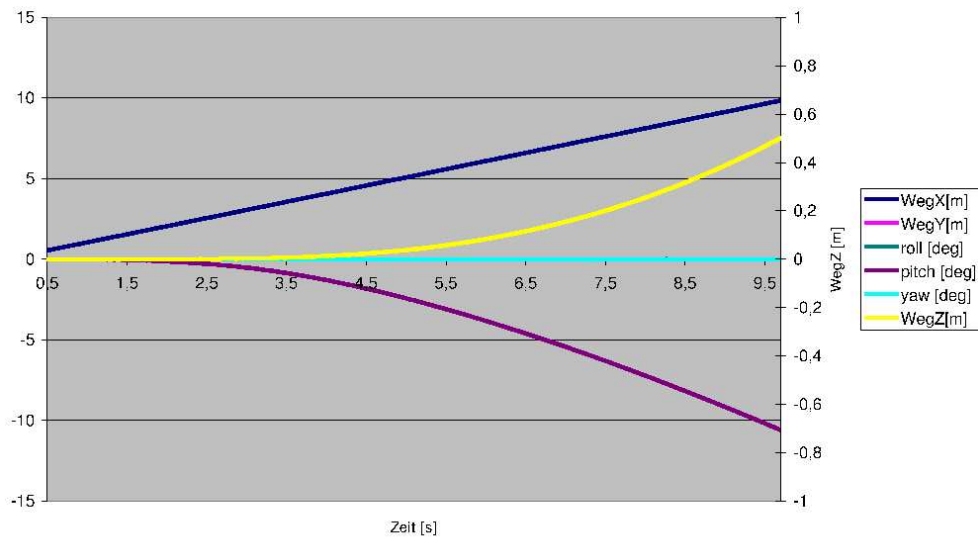


Abbildung 31: Berechnete Bahndaten

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Das Strömungsfeld um ein manövrierendes Unterseeboot wird stark von der Dynamik des Bootes beeinflusst. Das instationäre Strömungsverhalten um ein Unterseeboot, aufgrund der Komplexität der Geometrie mit vielen Anhängen und Aufbauten, stellt hohe Anforderungen an die Berechnungsmethode. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, das die Bewegungssimulation von Unterwasserfahrzeugen mit Hilfe von RANSE-Berechnungen ermöglicht.

Das Ziel, ein Rechenverfahren zur Simulation von Bootsmanövern zu entwickeln, das die Strömung mit einem vorhandenen CFD Code berechnet, wurde realisiert. Das vorgestellte Verfahren zur Umsetzung der Bewegungen im RANSE-Löser unterliegt keinen räumlichen Restriktionen, so daß es auch die Betrachtung räumlich ausgedehnter Bootsmanöver zuläßt, was bisher in diesem Umfang mit anderen Methoden noch nicht möglich war. Dies wird durch die Verwendung eines beweglichen Rechengitters möglich, das sich frei im Raum bewegt. Während der Berechnung kann die Gitterqualität konstant gehalten werden, da sie nicht durch die Gitterbewegung beeinflusst wird. Die in dieser Arbeit verwendete Methode der Gitterbewegung stellt hohe Ansprüche an die Netzgenerierung, so daß erheblicher Arbeitsaufwand notwendig ist. Dafür kann jedoch dieses Netz für unterschiedliche Bewegungssimulationen verwendet werden, da das Rechengitter nicht auf einen speziellen Berechnungsfall abgestimmt ist, wodurch erneute Vernetzungsarbeit eingespart werden kann. Da das Rechengitter, mit Ausnahme der Ruderumgebung, keiner geometrischen Änderung unterliegt und keine Interpolations- oder Rundungsfehler an der Außenberandung auftreten, sind die Berechnungsergebnisse zu jedem Zeitpunkt von konstanter Qualität.

Die Einbindung eines Propellermodells in die Berechnungen ermöglicht es, den Einfluß des rotierenden Propulsors in die Umströmung des bewegten Körpers einzubeziehen. Die Implementierung des Propellermodells in die Bewegungssimulation wurde erfolgreich durchgeführt, so daß die Propellerwirkung bei vorgegebenen Manövern berücksichtigt werden kann. Dadurch lassen sich die Druck- und Geschwindigkeitsverteilungen an

einem manövrierenden Fahrzeug noch realitätsnäher abbilden und analysieren. Damit kann beispielsweise die Wechselwirkung zwischen Propellereinfluß und Nachstrom am manövrierenden Fahrzeug untersucht und visualisiert werden.

Eine große Herausforderung stellte die Realisierung der beweglichen Ruder im Rechengitter dar. Dafür wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Bewegung realer Rudergeometrien ermöglicht. Dabei wurde auf die Besonderheiten moderner deutscher Unterseebootsentwürfe Rücksicht genommen. Diese Entwürfe zeichnen sich durch eine sehr kompakte Bauweise aus, so daß der Raum für die Gittergenerierung um die Ruder sehr begrenzt ist. Hierfür werden um die beweglichen Ruder eigenständige Domains erzeugt, die über Interfaces an das umgebende Rechengebiet angebunden sind. In den Ruderdomains werden dann die Rotationen durch eine Kombination aus gleitenden Interfaces und Knotenverschiebung realisiert. Das umgesetzte Verfahren ermöglicht sowohl die Untersuchung von X-Rudern, wie auch die Untersuchung von Kreuzruderkonfigurationen. Zur Realisierung dieses Verfahrens mußten auf Seiten des Softwareherstellers Anpassungen am Programmpaket vorgenommen werden, um die Bewegung der gleitenden Interfaces in einem bewegten Rechengitter zu ermöglichen. Die Implementierung der Ruderbewegung, auch von komplexen Rudergeometrien in die viskose Berechnung, erweitert die Simulationmöglichkeiten um einen wichtigen Teil. Die durch die Anstellung der Ruder erzeugten Ruderkräfte können analysiert werden und für die Bewegungssimulation herangezogen werden.

Die in der Arbeit vorgestellten Berechnungen betrachten die untersuchten Geometrien als Starrkörpermodell, so daß keine Deformationen und Volumenänderungen der Bootshülle berücksichtigt werden.

Die in Kapitel vier beschriebenen Untersuchungen der Umströmung eines Bootes während eines Notauftauchmanövers, geben Einblicke in die temporäre Druckverteilung am Rumpf. Bei der untersuchten Bootsform sprechen die Ergebnisse dafür, daß die vertikale Umströmung des Rumpfes ursächlich für den Beginn der Rollbewegung ist. Da die Rumpfform mit dem aufgesetzten Oberdeck annähernd einen Tragflügelquerschnitt bildet, erzeugt diese bei vertikaler Anströmung Unter- und Überdruck. Diese unterschiedlichen Über- und Unterdruckbereiche am Rumpf bewirken ein Drehmoment, welches eine

Rollbewegung hervorruft, wodurch der Tragflügeleffekt weiter verstärkt wird. In diesem Bereich müssen weitere genauere Untersuchungen zeigen, wie stark die Querschnittsgeometrie die Rollbewegungen beeinflusst und wie eine Modifizierung der Geometrie die Rollbewegung verringern kann.

Die Kopplung der viskosen, instationären Strömungsberechnung mit einer Routine zur Lösung der Bewegungsgleichung in sechs Freiheitsgraden wurde realisiert und in verschiedenen Testrechnungen die Funktionalität nachgewiesen. Dazu wurden eine Beschleunigungsfahrt und verschiedene Testrechnungen mit einfachen Testkörpern, wie auch der Beginn eines Abtauchmanövers berechnet. Der durch Einbindung des am IST entwickelten Propellermodells erzeugte Schub bewirkt eine Beschleunigung der verwendeten Testgeometrie. Durch die Vorgabe eines konstanten Schubes und durch das Auslenken der Tiefenruder konnte erfolgreich der Beginn eines Abtauchmanövers eines freifahrenden Bootes simuliert werden. Die bei dem Manöver ermittelten Kräfte sind logisch und nachvollziehbar, der sich daraus ergebende Bahnverlauf stimmt gut mit Ergebnissen anderer Rechenverfahren überein.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die in dieser Arbeit realisierten Verfahren die Berechnung von Bootsmanövern mit einem vorhandenen Programmpaket erlauben, das nicht primär für diese Anwendungsfälle geschrieben wurde. Jedoch ist derzeit die Berechnungszeit für effektive Berechnungen und Untersuchungen noch sehr hoch, aber kann in Zukunft durch steigende Rechnerleistung verringert werden. Hauptursache hierfür ist die Einbindung beweglicher Ruderdomains, die über eine große Anzahl von Interfaceflächen an das restliche Rechengebiet angekoppelt sind. Diese Interfaceflächen verlangen für eine fehlerfreie Strömungsberechnung eine relativ hohe Gitterauflösung an den Übergängen, wodurch die Anzahl der Gitterpunkte schon bei einfachen Testrechnungen verhältnismäßig groß wird. Berechnungszeit steigernd wirken sich die zusätzlichen Domains dadurch aus, daß für jede einzelne Domain die iterative Gitterverschiebung in jedem Zeitschritt berechnet wird.

Der prinzipielle Funktionsnachweis zeigt, daß die entwickelten Programme gekoppelt eingesetzt werden können und tendenziell richtige Ergebnisse liefern.

Da die Entwicklung von eigenen CFD-Codes sehr zeit- und kostenintensiv ist, bietet der

Rückgriff auf vorhandene Codes die Möglichkeit, den Kosten- und Personaleinsatz zu reduzieren und dennoch auf stetig fortentwickelte Turbulenzmodelle oder Partitionierungsverfahren für die Parallelisierung zurück greifen zu können. Die Implementierung eigener Routinen und Funktionen in vorhandene RANSE-Löser, die für vielfältige Anwendungen entwickelt wurden, ermöglicht es dem Nutzer, Spezialanwendungen, wie beispielsweise die Bewegungssimulation von Unterwasserfahrzeugen, durchzuführen, für die ansonsten eine eigene Codeentwicklung sehr kostenintensiv wäre.

6.2 Ausblick

Bei Zunahme der Rechenleistung von zugänglicher Hardware ist die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Turbulenzmodelle auf die Umströmung und die damit verbundenen Kräfte auf die Bootsgeometrie erstrebenswert, dies würde aber eine feinere Gitterauflösung im Bereich der Grenzschicht erfordern und damit den Rechenaufwand zusätzlich erhöhen. Lohnenswert wäre auch die Untersuchung verschiedener Manöver mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Ruderanstellwinkeln, um das Manövrierverhalten genauer zu untersuchen.

Aufbauend auf diese Arbeit läßt sich die Untersuchung des Durchdringens der Freioberfläche berücksichtigen. Dies würde die Simulation von Auftauchmanövern durch die Oberfläche erlauben, was bei der Untersuchung von Unterseebooten, Bojen oder auch Flugkörpern von Interesse sein kann. Auch an die viskose Berechnung von Absinkvorgängen ist zu denken, wie sie beispielsweise bei der Gründung von meerestechnischen Bauwerken durch Senkkästen oder bei Schiffsuntergängen erforderlich ist.

Durch eine Fluid-Struktur-Kopplung könnten die Auswirkungen der strömungserregten Schwingungen während eines Manövers untersucht werden. Durch die Druckschwankungen erzeugte Erregerfrequenzen könnten analysiert und konstruktive Lösungen zur Beseitigung im FEM-Modell untersucht werden.

Auch ist die Berücksichtigung rotierender Propellergeometrien denkbar, um die Wirbelausbreitung hinter dem manövrierenden Boot durch dynamische Gitterverfeinerung im

Propellerstrahl besser zu betrachten.

Unterschiedliche Ruderkonfigurationen und deren Auswirkungen auf die Manövrierbarkeit des Bootes, können mit wachsender Rechenleistung untersucht werden.

Für alle diskutierten Beispiele muß jedoch der immer noch immense Aufwand berücksichtigt werden, der für die hier dargestellten Berechnungen erforderlich ist, so daß diese Rechnungen auch in den nächsten Jahren nur für wenige ausgewählte Anwendungsfälle eingesetzt werden können.

7 Abbildungen

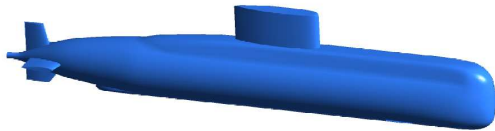


Abbildung 32: Seitenansicht Klasse 209

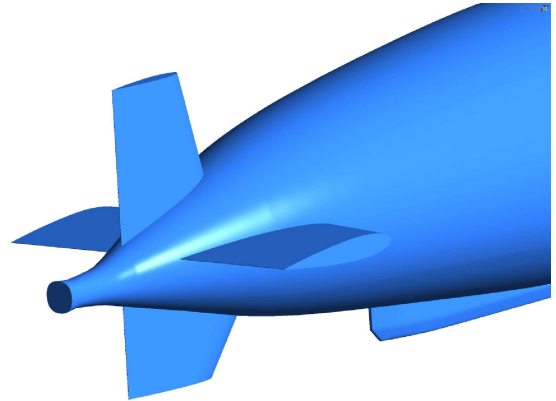


Abbildung 33: Heckansicht Klasse 209

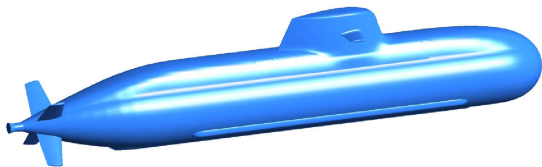


Abbildung 34: Seitenansicht Klasse 212

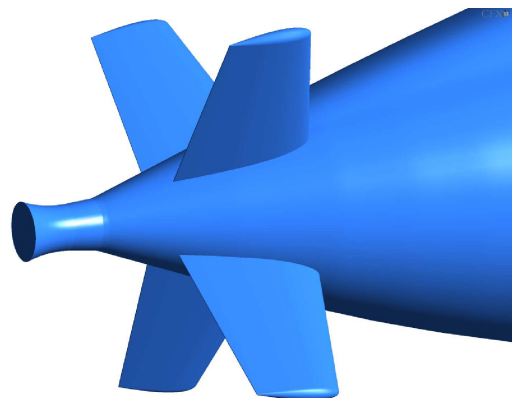


Abbildung 35: Heckansicht Klasse 212

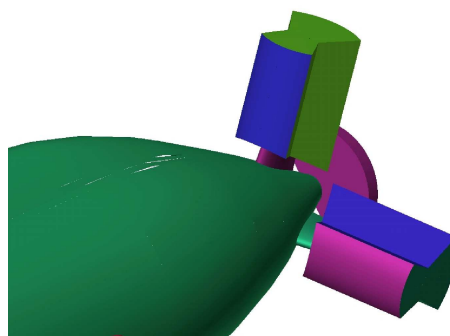
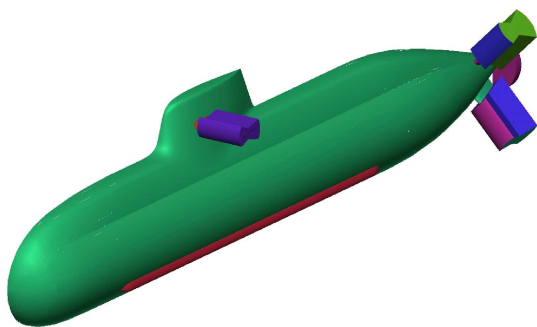


Abbildung 36: Klasse 212 mit Ruderdo-
mains

Abbildung 37: Klasse 212 mit Ruderdo-
mains

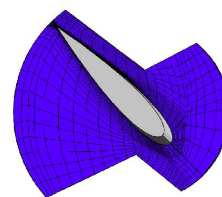
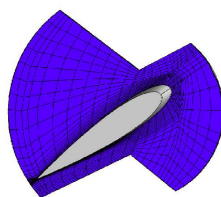
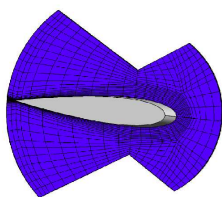


Abbildung 38: 0-Grad Stel-
lung

Abbildung 39: 40-Grad
Stellung

Abbildung 40: -40-Grad
Stellung

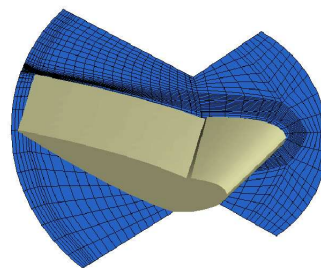
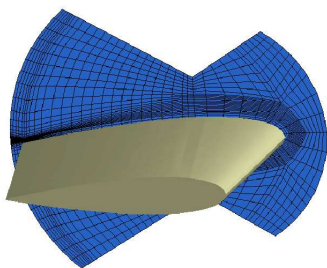


Abbildung 41: Halbschweberuder mit 0-
Grad Ruderausschlag

Abbildung 42: Halbschweberuder mit -25-
Grad Ruderausschlag

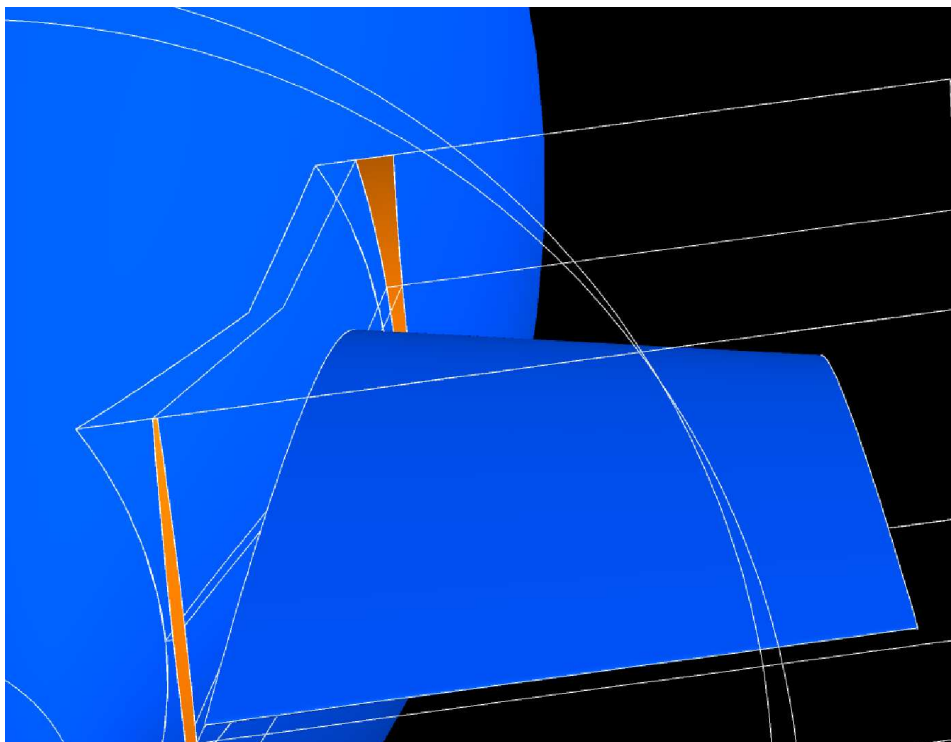


Abbildung 43: Konkav-Konvexer-Bahnverlauf am Interface

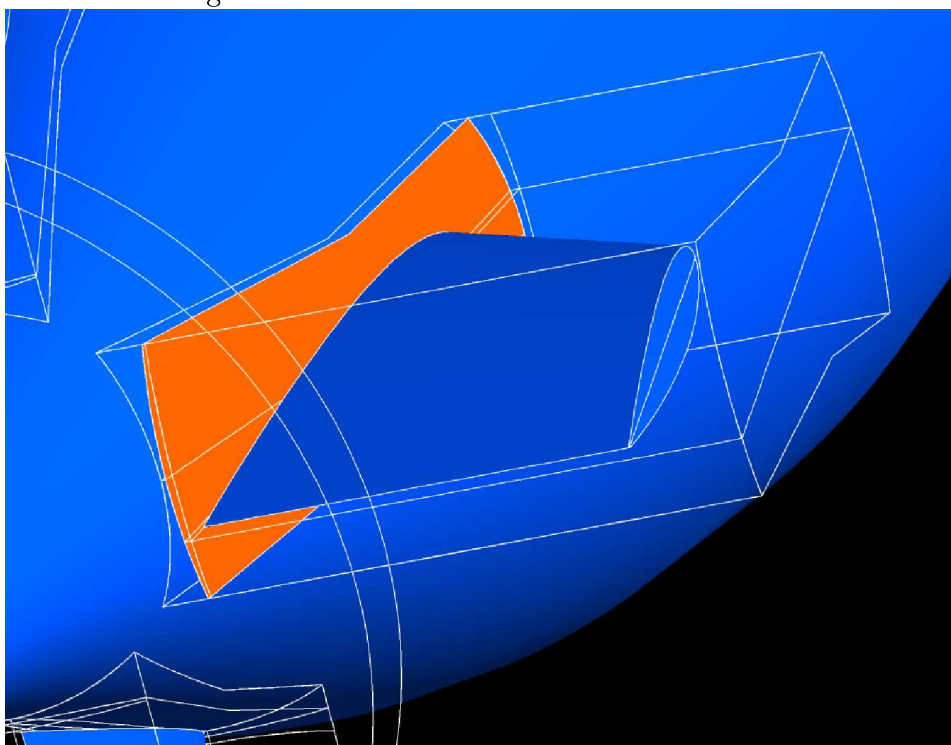


Abbildung 44: Interfacefläche im Ruderspalt

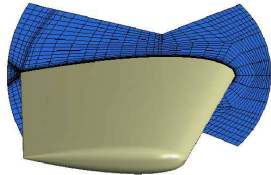


Abbildung 45: 0-Grad U212

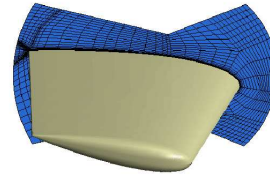


Abbildung 46: -10-Grad U212

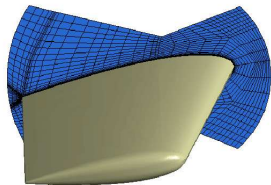


Abbildung 47: 10-Grad U212

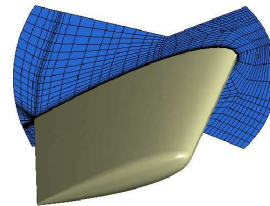


Abbildung 48: 20-Grad U212

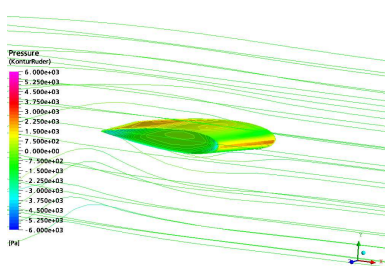


Abbildung 49: Ruder mit Stromlinien
0-Grad

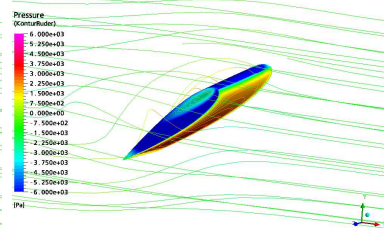


Abbildung 50: Ruder mit Stromlinien
40-Grad

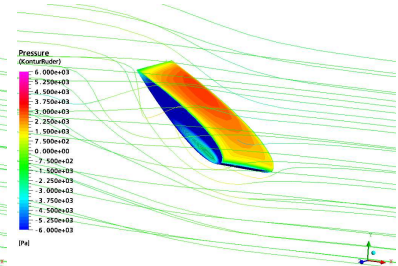


Abbildung 51: Ruder mit Stromlinien
-40-Grad

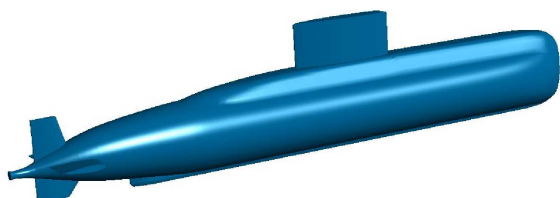


Abbildung 52: Boot Steuerbordansicht

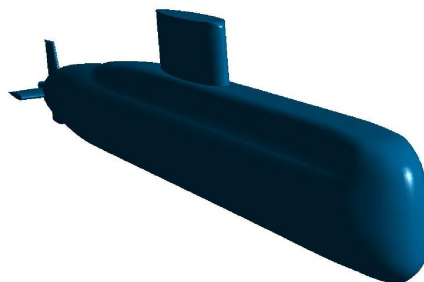


Abbildung 53: Boot schräg von vorne

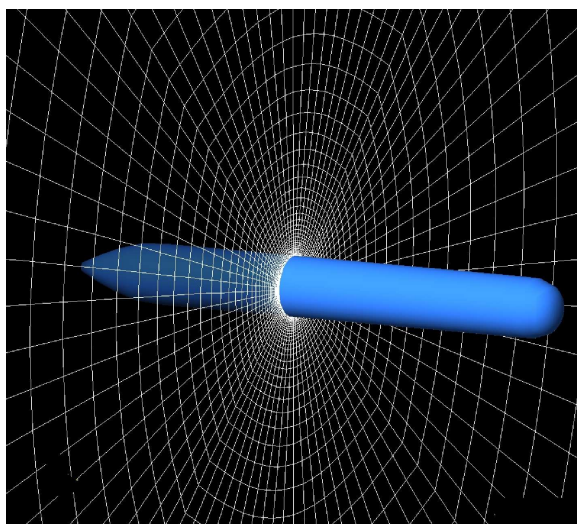


Abbildung 54: Gitter in radialer Ausdehnung

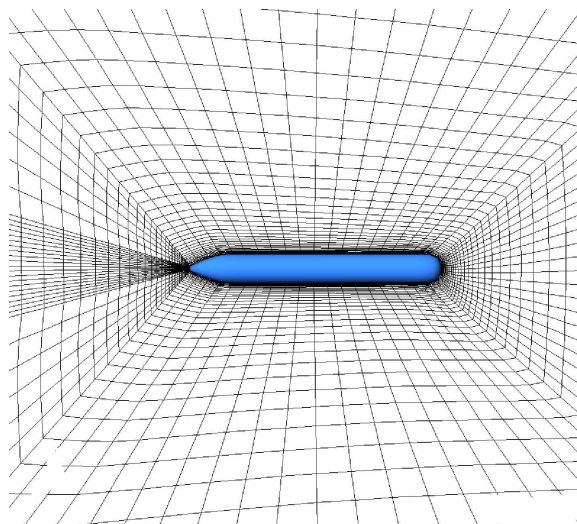


Abbildung 55: Gitterqualität im Nahfeld nach der Verzerrung

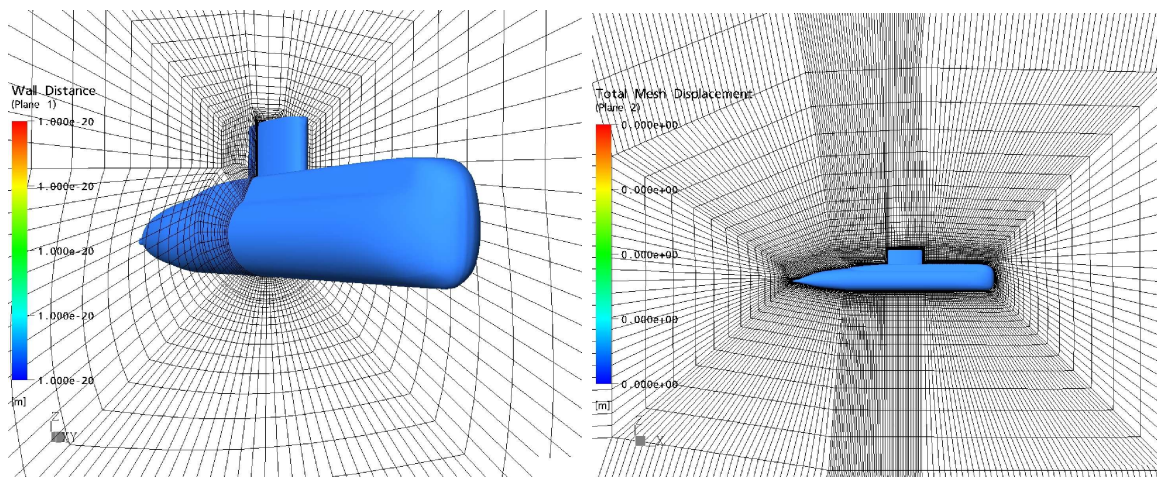


Abbildung 56: Rechengitter schräg von Abbildung 57: Rechengitter in der Seiten-
vorne gesehen ansicht

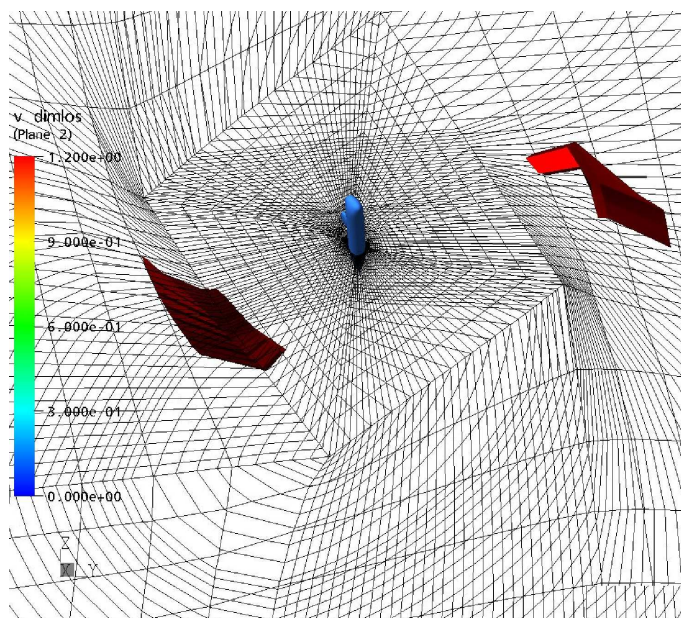


Abbildung 58: Rechengitter mit Zellen kleiner 20°

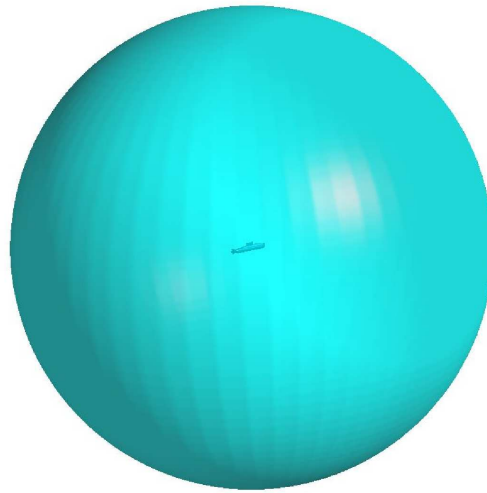


Abbildung 59: Kugelförmige Domain mit Bootsgeometrie

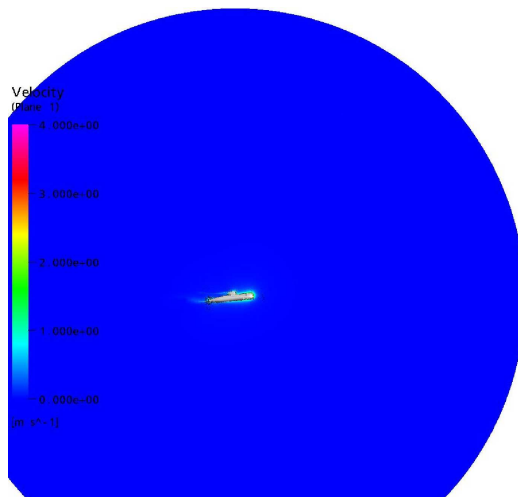
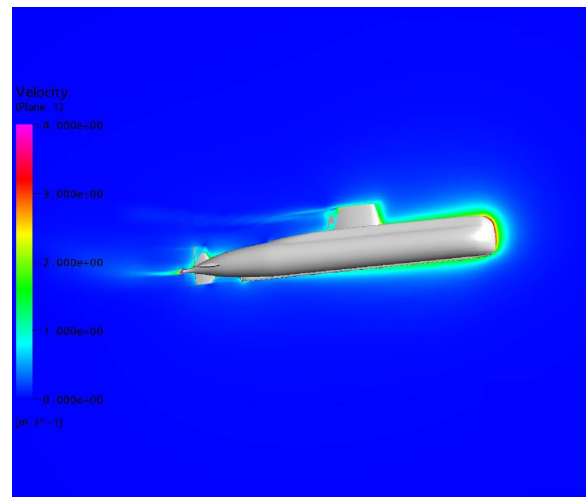


Abbildung 60: Geschwindigkeiten in der Abbildung 61: Geschwindigkeiten um das
Domain Boot



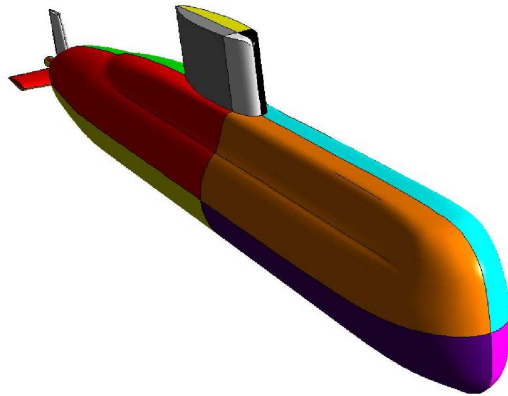


Abbildung 62: Flächenunterteilung der Außenhaut

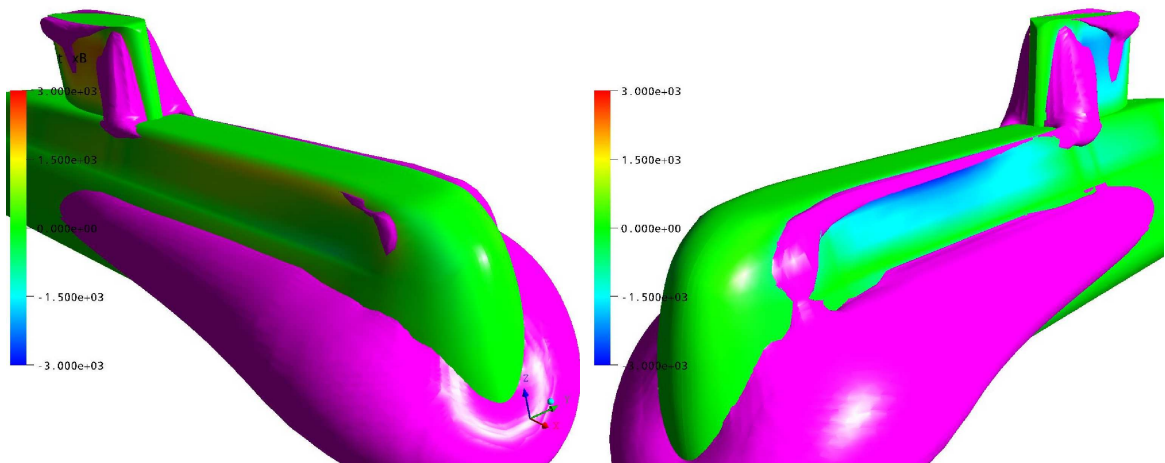


Abbildung 63: Isofläche des Druckes, Steu-
erbord

Abbildung 64: Isofläche des Druckes,
Backbord

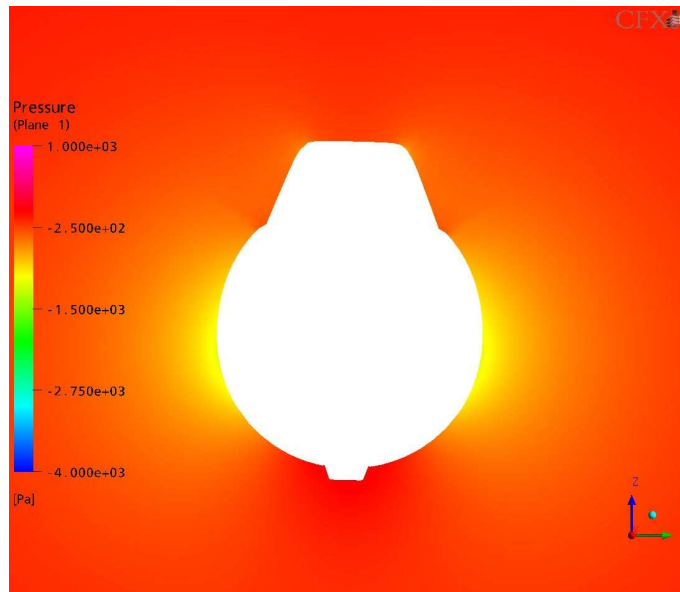


Abbildung 65: Druck am Vorschiff nach 13,5 Prozent der Simulationszeit

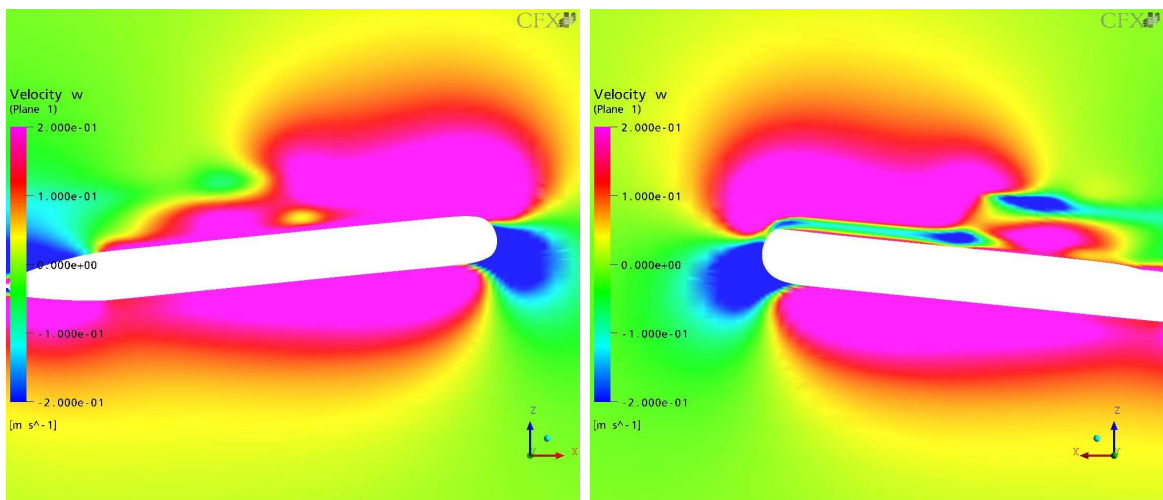


Abbildung 66: Geschwindigkeiten
in z-Richtung nach 34 Pro-
zent der Simulationszeit
Steuerbord

Abbildung 67: Geschwindigkeiten
in z-Richtung nach 34 Pro-
zent der Simulationszeit
Backbord

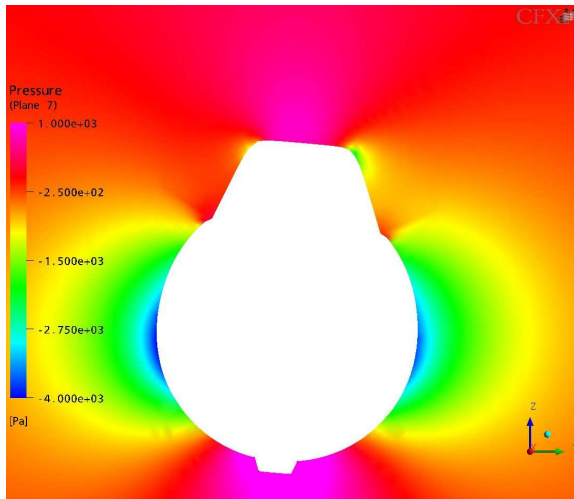


Abbildung 68: Druck am Vorschiff nach 34 Prozent der Simulationszeit

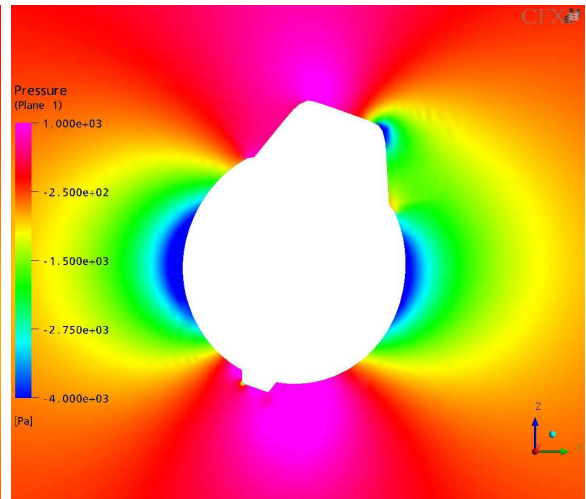


Abbildung 69: Druck am Vorschiff nach 50 Prozent der Simulationszeit

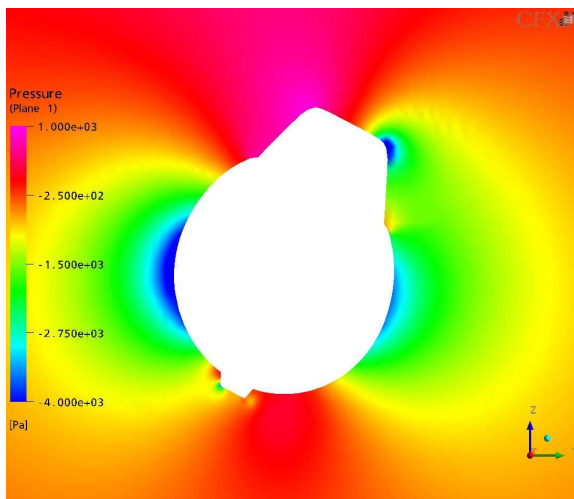


Abbildung 70: Druck am Vorschiff nach 62 Prozent der Simulationszeit

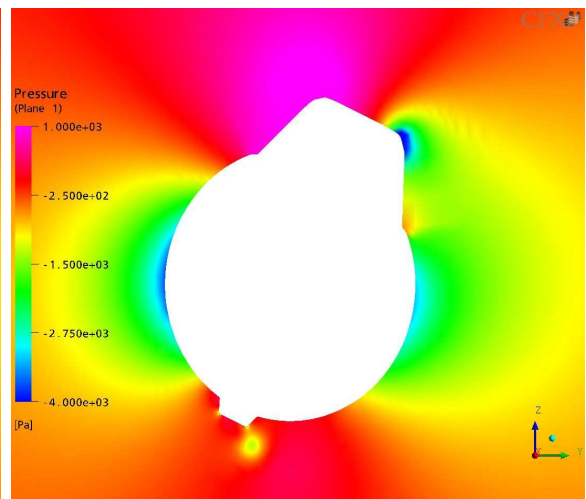


Abbildung 71: Druck am Vorschiff nach 64 Prozent der Simulationszeit

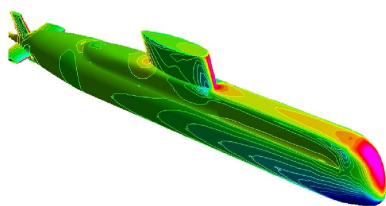


Abbildung 72: Druckverteilung am Boot
nach 32 Prozent der Simu-
lationszeit

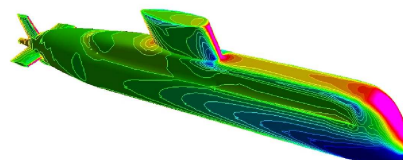


Abbildung 73: Druckverteilung am Boot
nach 42 Prozent der Simu-
lationszeit

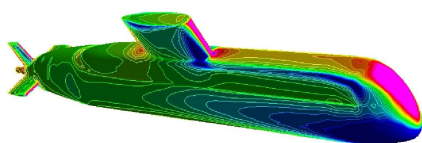


Abbildung 74: Druckverteilung am Boot
nach 57 Prozent der Simu-
lationszeit

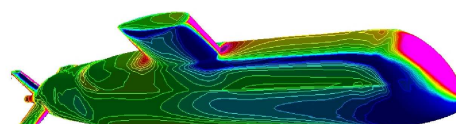


Abbildung 75: Druckverteilung am Boot
nach 63 Prozent der Simu-
lationszeit

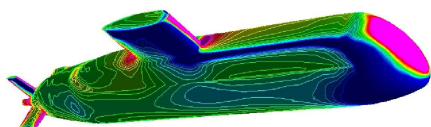


Abbildung 76: Druckverteilung am Boot nach 72 Prozent der Simulationszeit

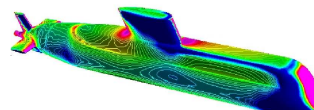


Abbildung 77: Druckverteilung am Boot nach 82 Prozent der Simulationszeit

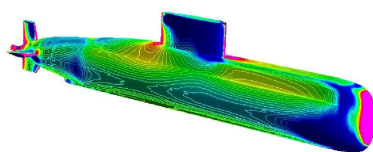


Abbildung 78: Druckverteilung am Boot nach 90 Prozent der Simulationszeit

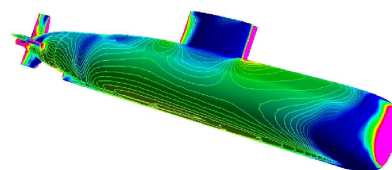


Abbildung 79: Druckverteilung am Boot nach 97 Prozent der Simulationszeit

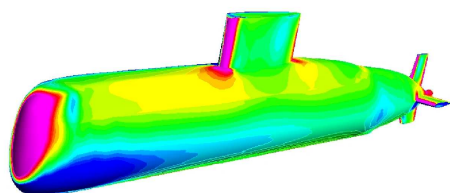


Abbildung 80: Druckverteilung am Boot
nach 72 Prozent der Simu-
lationszeit

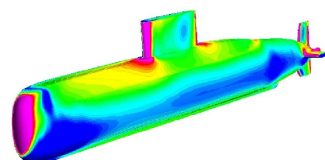


Abbildung 81: Druckverteilung am Boot
nach 82 Prozent der Simu-
lationszeit

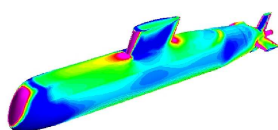


Abbildung 82: Druckverteilung am Boot-
nach 90 Prozent der Simu-
lationszeit

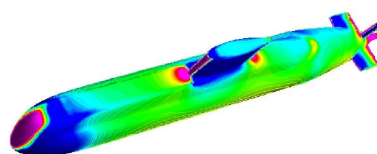
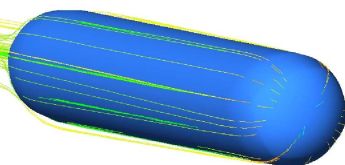


Abbildung 83: Druckverteilung am Boot
nach 97 Prozent der Simu-
lationszeit

Velocity
(Streamline 1)
6.432e+00
4.828e+00
3.225e+00
1.621e+00
1.798e-02
[m s⁻¹]



Velocity
(Streamline 1)
6.432e+00
4.828e+00
3.225e+00
1.621e+00
1.798e-02
[m s⁻¹]

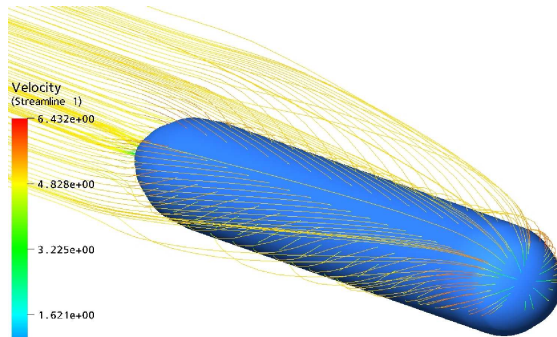


Abbildung 84: Stromlinien bei Voraus-
fahrt in der Ausgangslage

Abbildung 85: Stromlinien bei Queran-
strömung

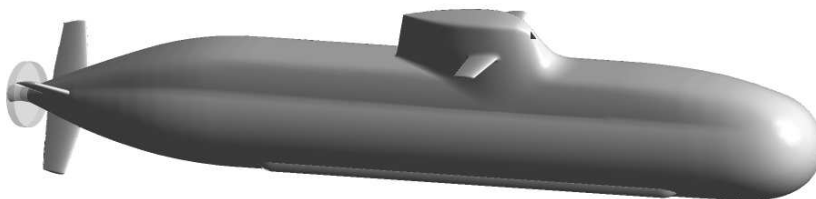


Abbildung 86: Geometrie der Klasse 212

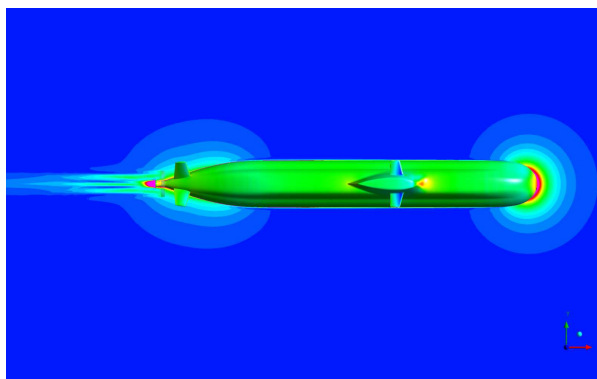


Abbildung 87: Geschwindigkeiten um das U-Boot in Vorausfahrt

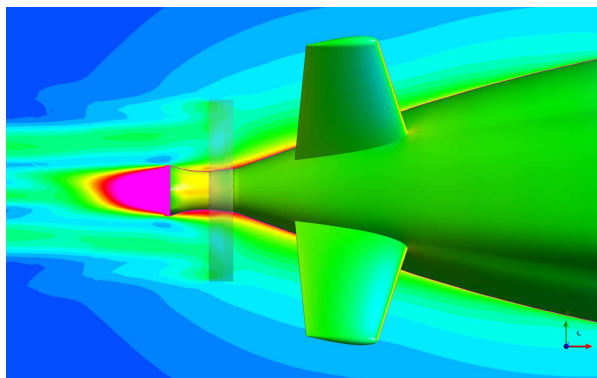


Abbildung 88: Geschwindigkeiten im Heckbereich in Vorausfahrt

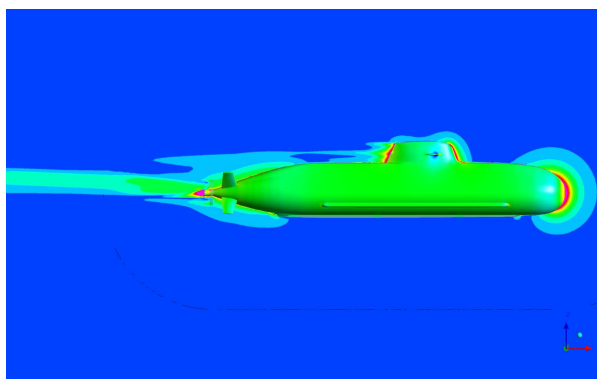


Abbildung 89: Geschwindigkeiten um das U-Boot in Vorausfahrt

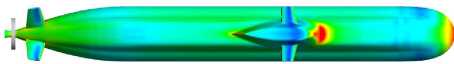


Abbildung 90: Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt absolut

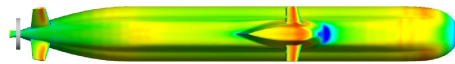


Abbildung 91: Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt relativ zum Boot

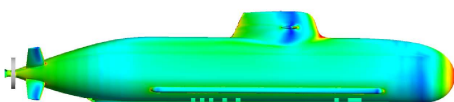


Abbildung 92: Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt absolut

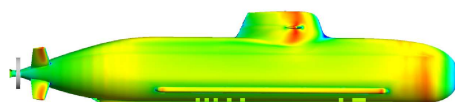


Abbildung 93: Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt relativ zum Boot

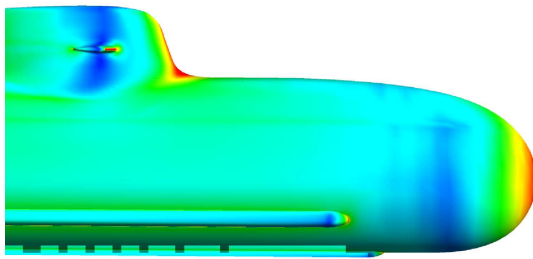


Abbildung 94: Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt absolut

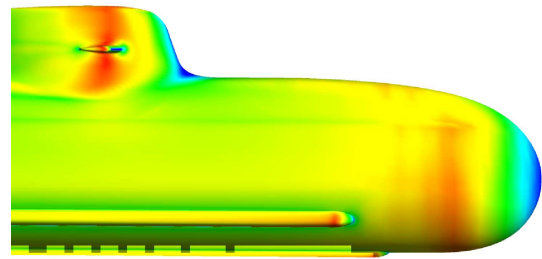


Abbildung 95: Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt relativ zum Boot

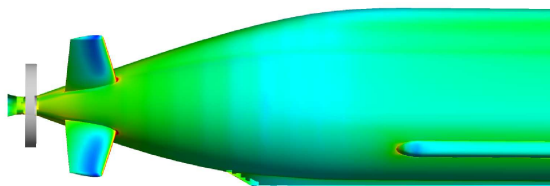


Abbildung 96: Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt absolut

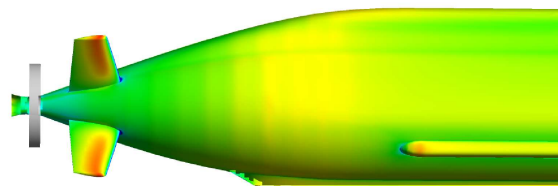


Abbildung 97: Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt relativ zum Boot

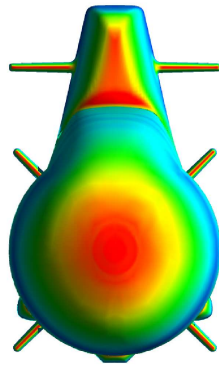


Abbildung 98: Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt absolut

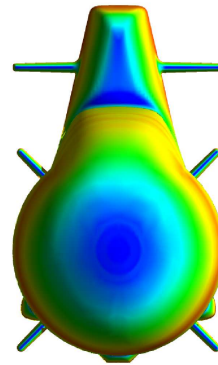


Abbildung 99: Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt relativ zum Boot

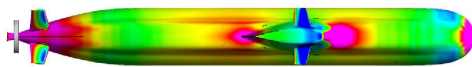


Abbildung 100: Druckverteilung am Boot bei Geradeausfahrt

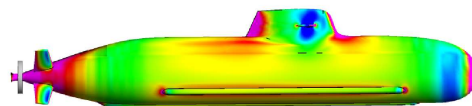


Abbildung 101: Druckverteilung am Boot bei Geradeausfahrt

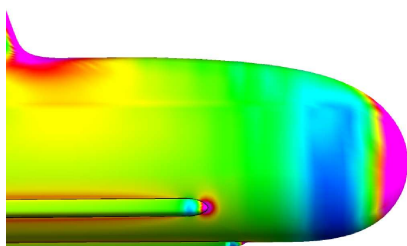


Abbildung 102: Druckverteilung am Boot
bei Geradeausfahrt

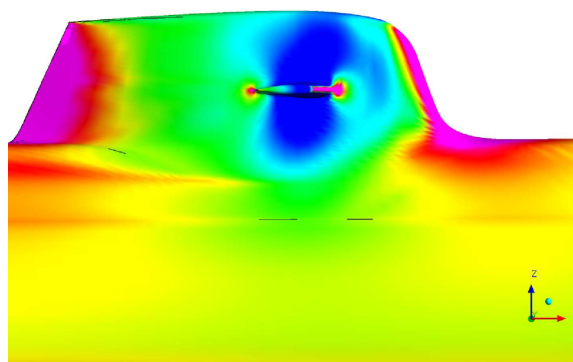


Abbildung 103: Druckverteilung am Boot
bei Geradeausfahrt

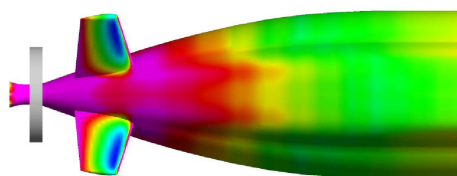


Abbildung 104: Druckverteilung am Boot
bei Geradeausfahrt

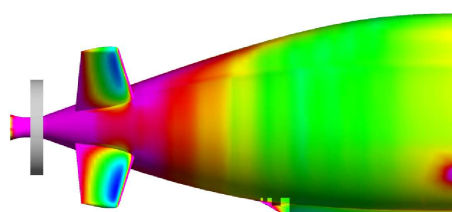


Abbildung 105: Druckverteilung am Boot
bei Geradeausfahrt

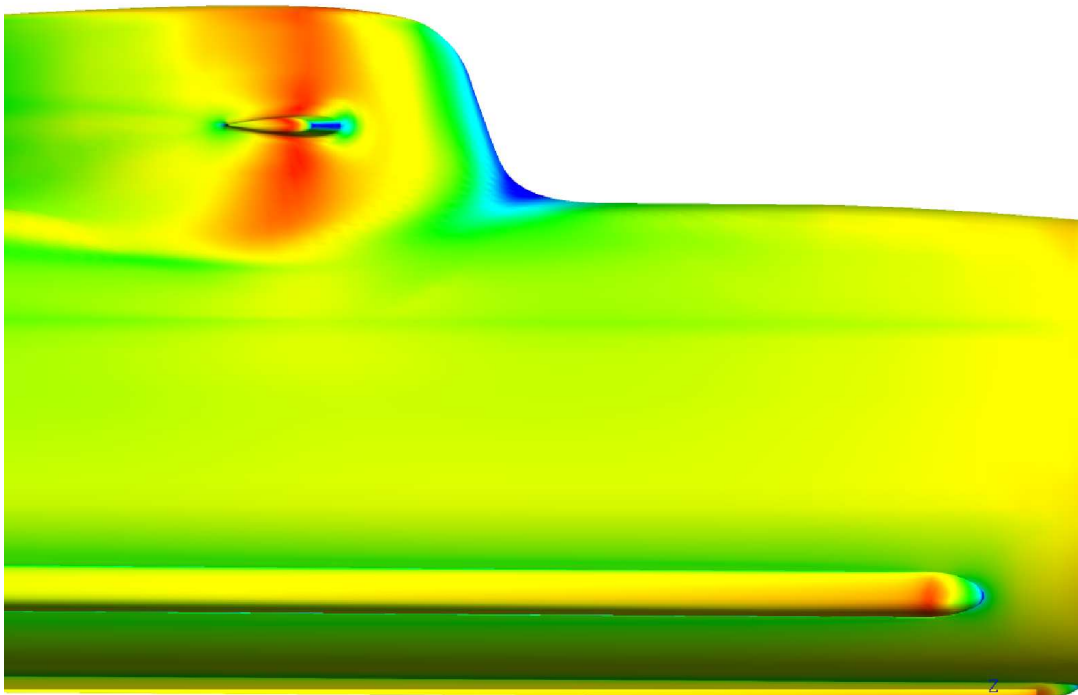


Abbildung 106: Geschwindigkeiten am Boot bei Geradeausfahrt relativ zum Boot

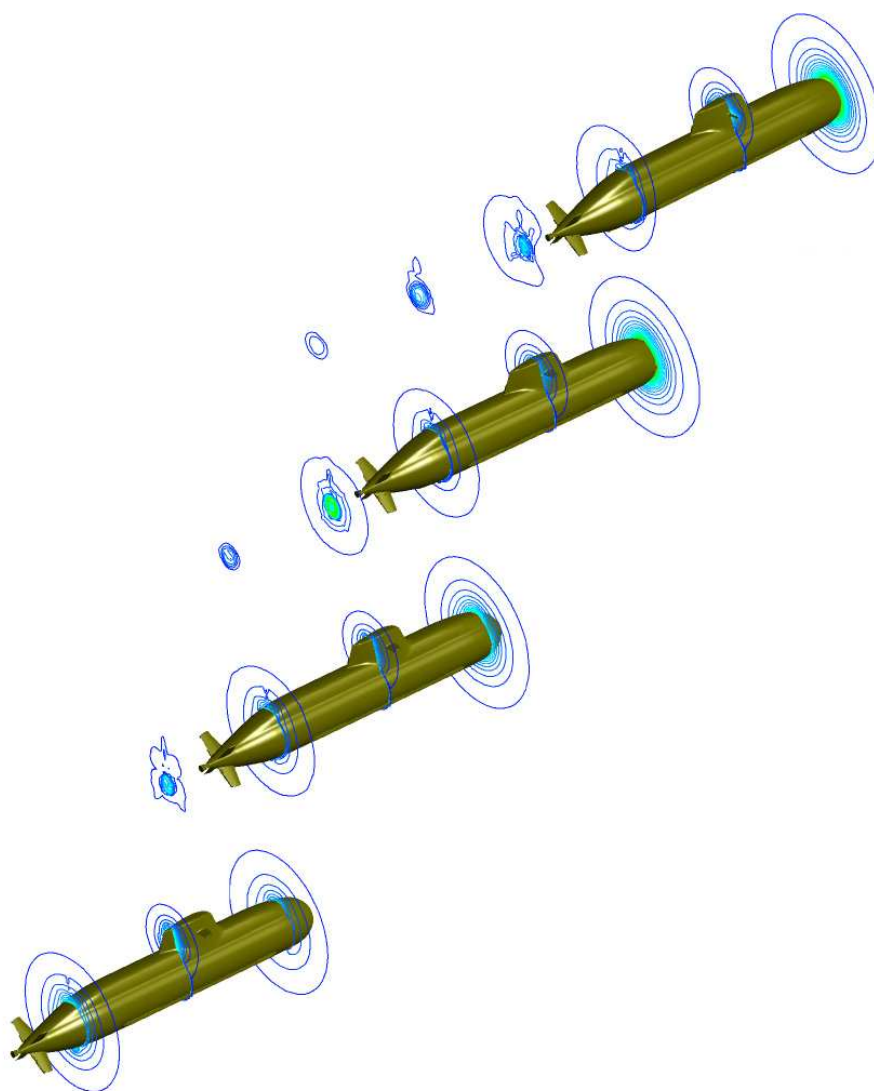


Abbildung 107: Geschwindigkeiten um das U-Boot in Vorfahrt

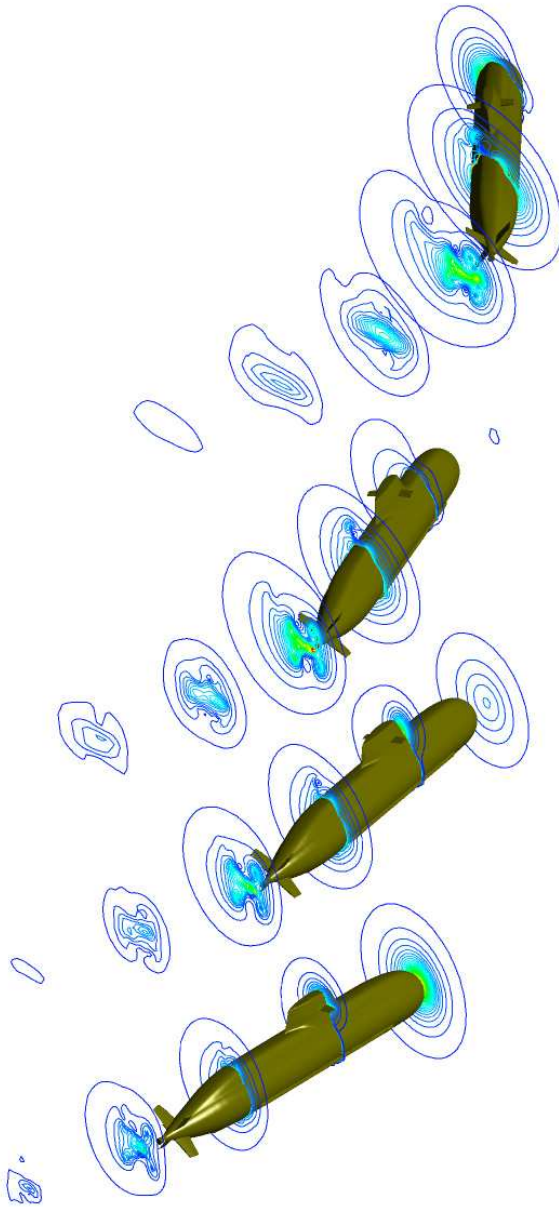


Abbildung 108: Geschwindigkeiten während des Drehkreises in mehreren yz-Ebenen

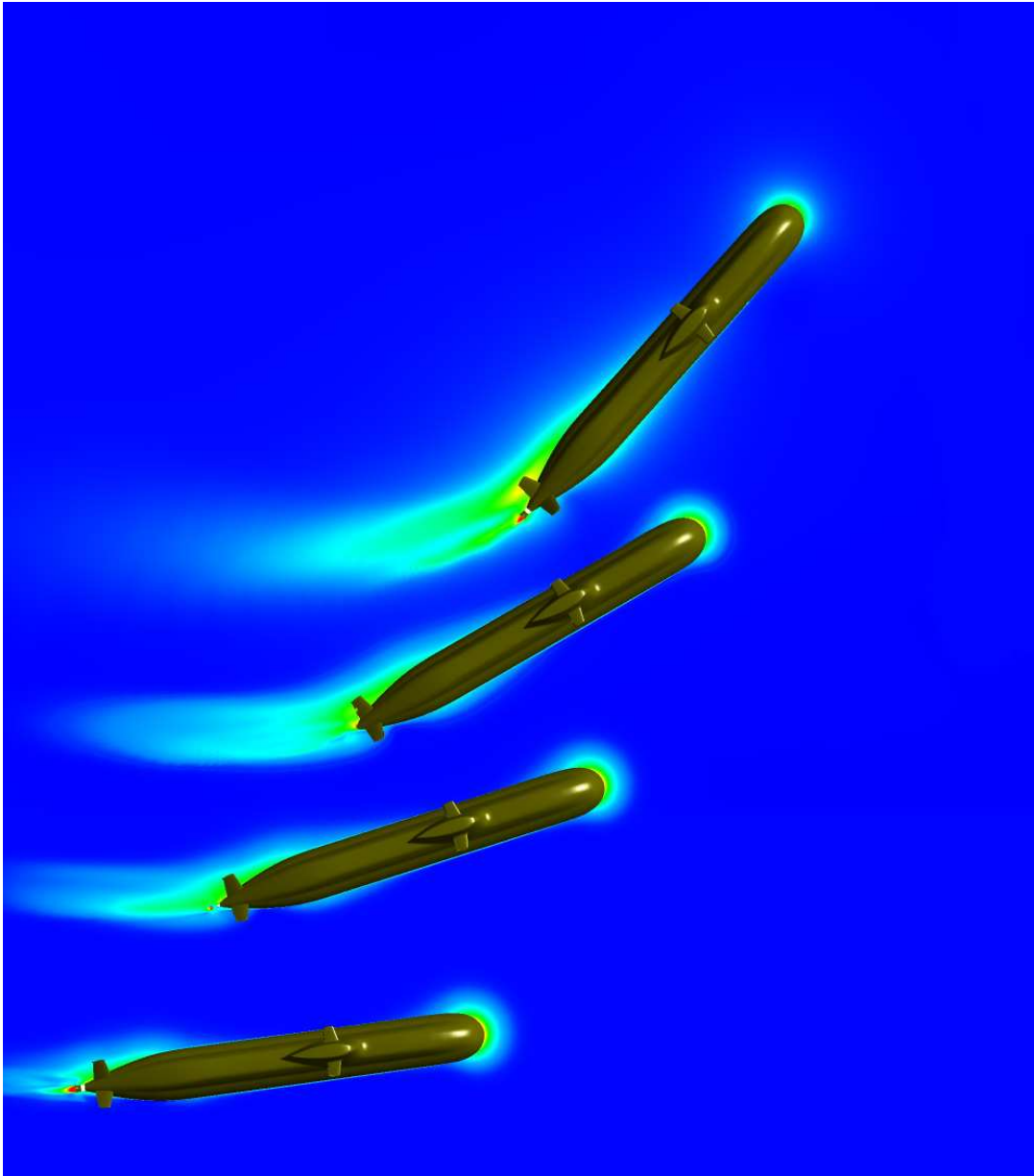


Abbildung 109: Geschwindigkeiten um das U-Boot im Drehkreis

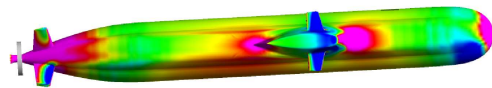
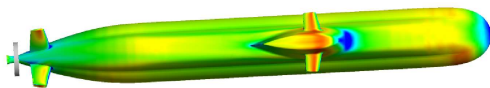


Abbildung 110: Geschwindigkeiten
Boot nach 15 Sekunden

am Abbildung 111: Druckverteilung am Boot
nach 15 Sekunden

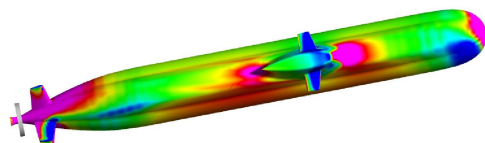
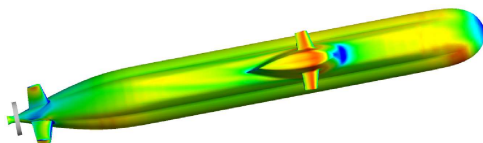


Abbildung 112: Geschwindigkeiten
Boot nach 18 Sekunden

am Abbildung 113: Druckverteilung am Boot
nach 18 Sekunden

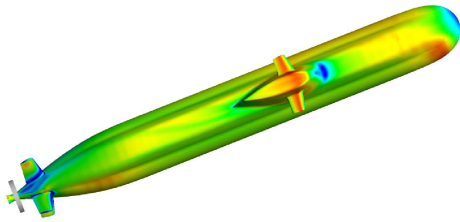
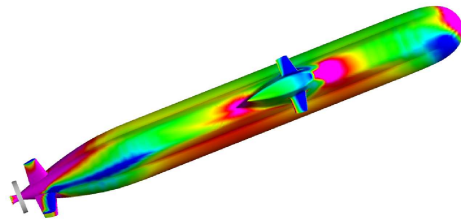


Abbildung 114: Geschwindigkeiten
Boot nach 21 Sekunden



am Abbildung 115: Druckverteilung am Boot
nach 21 Sekunden

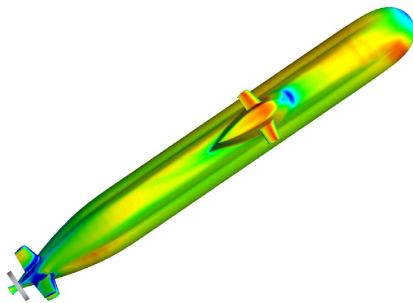
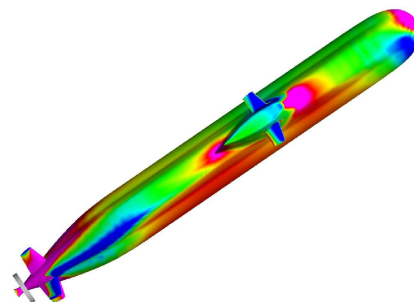


Abbildung 116: Geschwindigkeiten
Boot nach 24 Sekunden



am Abbildung 117: Druckverteilung am Boot
nach 24 Sekunden

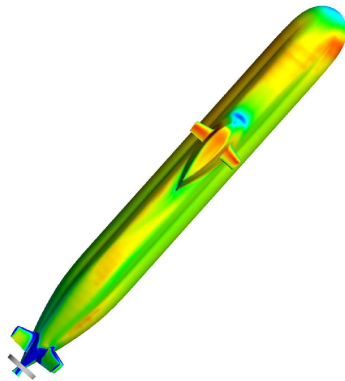


Abbildung 118: Geschwindigkeiten
Boot nach 27 Sekunden

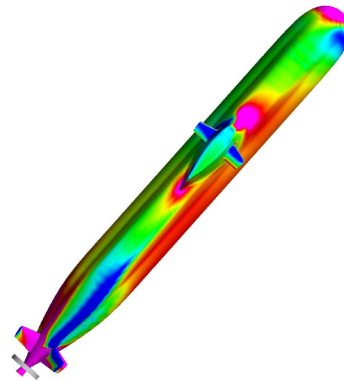


Abbildung 119: Druckverteilung am Boot
nach 27 Sekunden

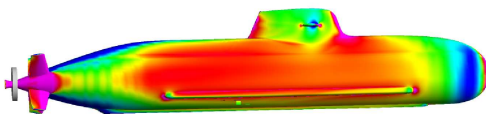


Abbildung 120: Druckverteilung am Boot
nach 27 Sekunden

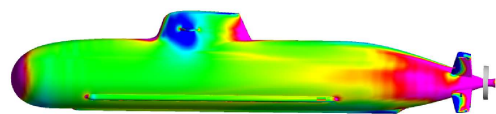


Abbildung 121: Druckverteilung am Boot
nach 27 Sekunden

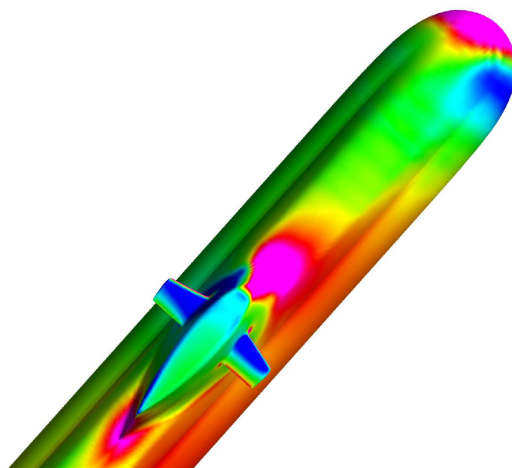


Abbildung 122: Druckverteilung am Boot nach 27 Sekunden

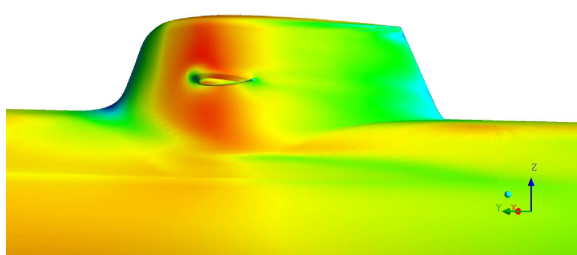


Abbildung 123: Geschwindigkeiten am
Boot nach 27 Sekunden
Backbord

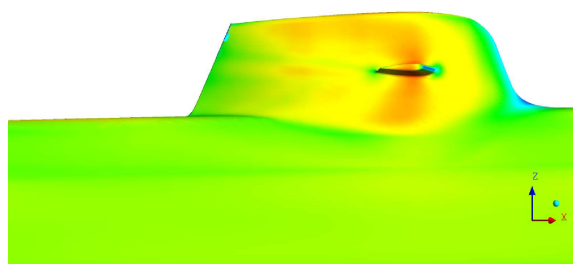


Abbildung 124: Geschwindigkeiten am
Boot nach 27 Sekunden
Steuerbord

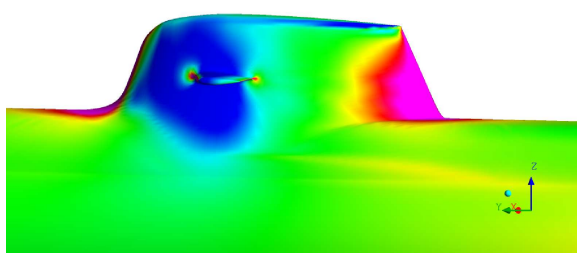


Abbildung 125: Druckverteilung am Boot
nach 27 Sekunden Back-
bord

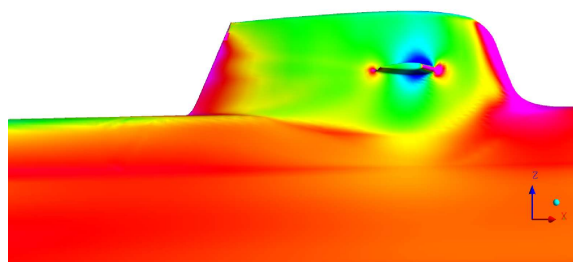


Abbildung 126: Druckverteilung am Boot
nach 27 Sekunden Steuer-
bord

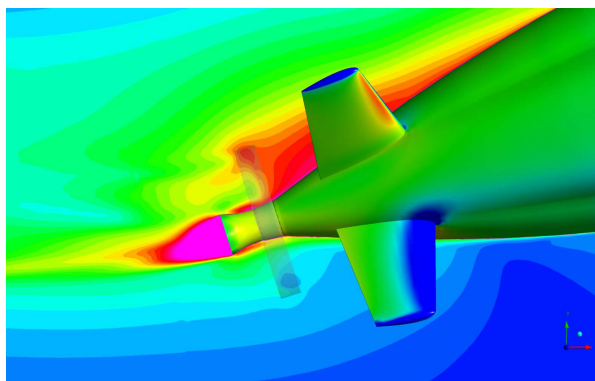


Abbildung 127: Geschwindigkeiten am Heck während des Drehkreises nach 20 Sekunden mit Ablösebereich

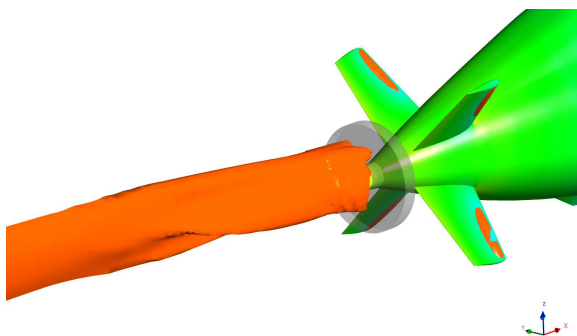


Abbildung 128: Bereiche gleicher Geschwindigkeiten hinter dem Propellermodell

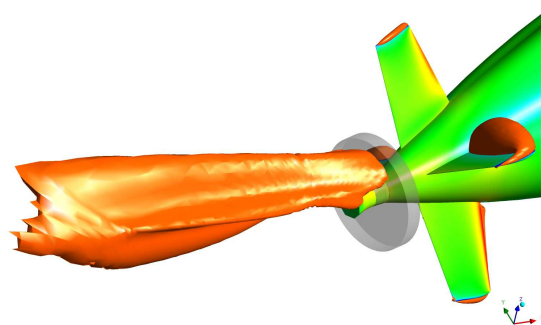


Abbildung 129: Bereiche gleicher Geschwindigkeiten hinter dem Propellermodell im Drehkreis

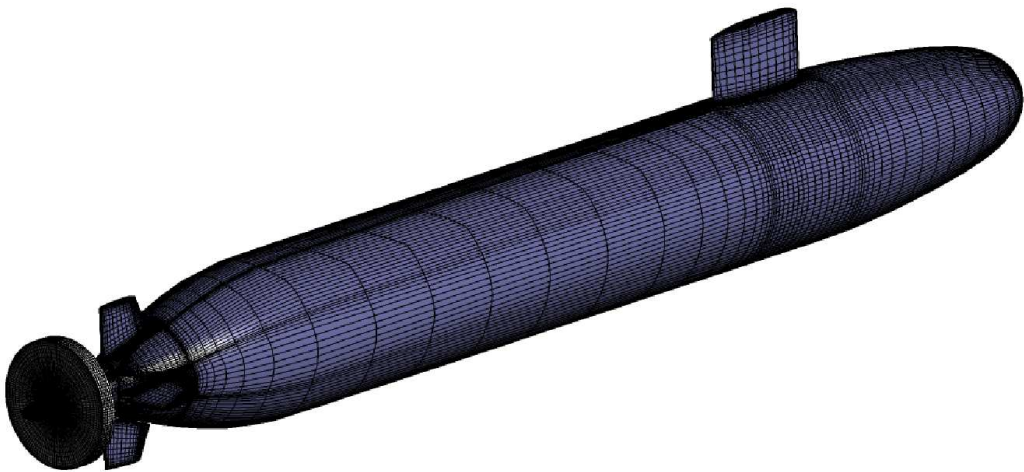


Abbildung 130: Gitterverteilung auf der Suboffgeometrie

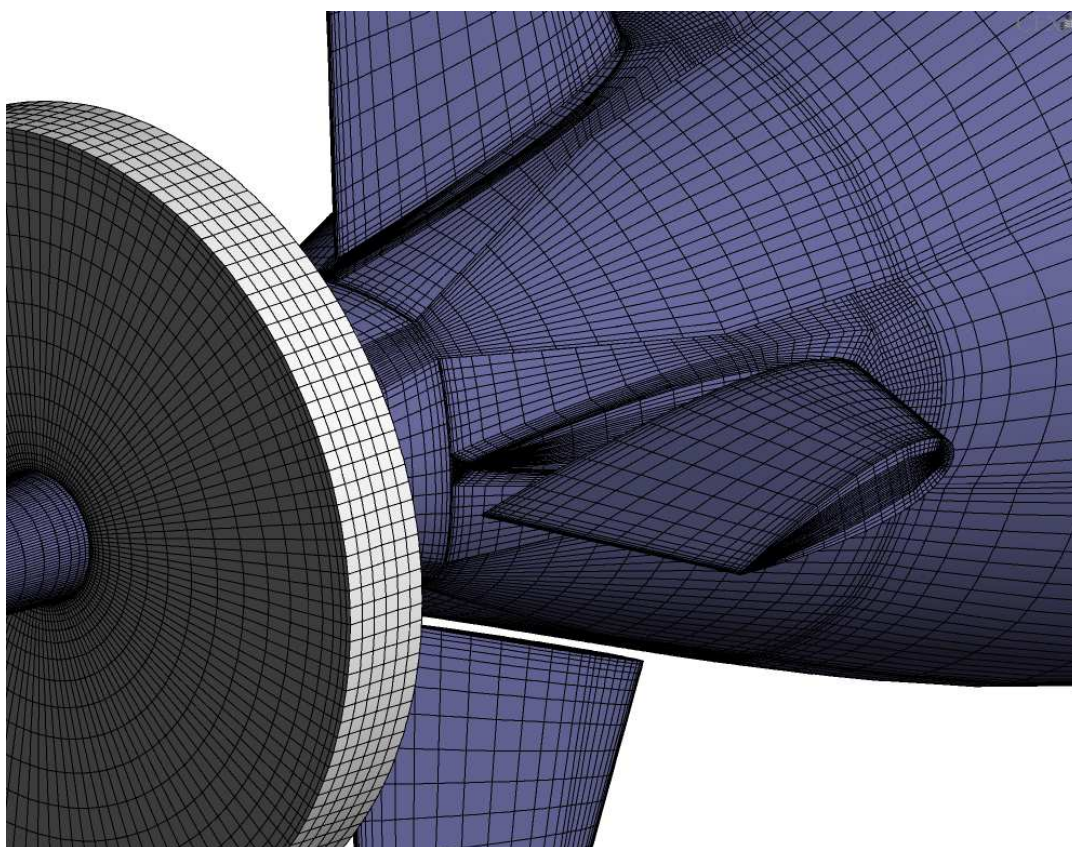


Abbildung 131: Gitterverteilung am Achterschiff bei Ruderausschlag

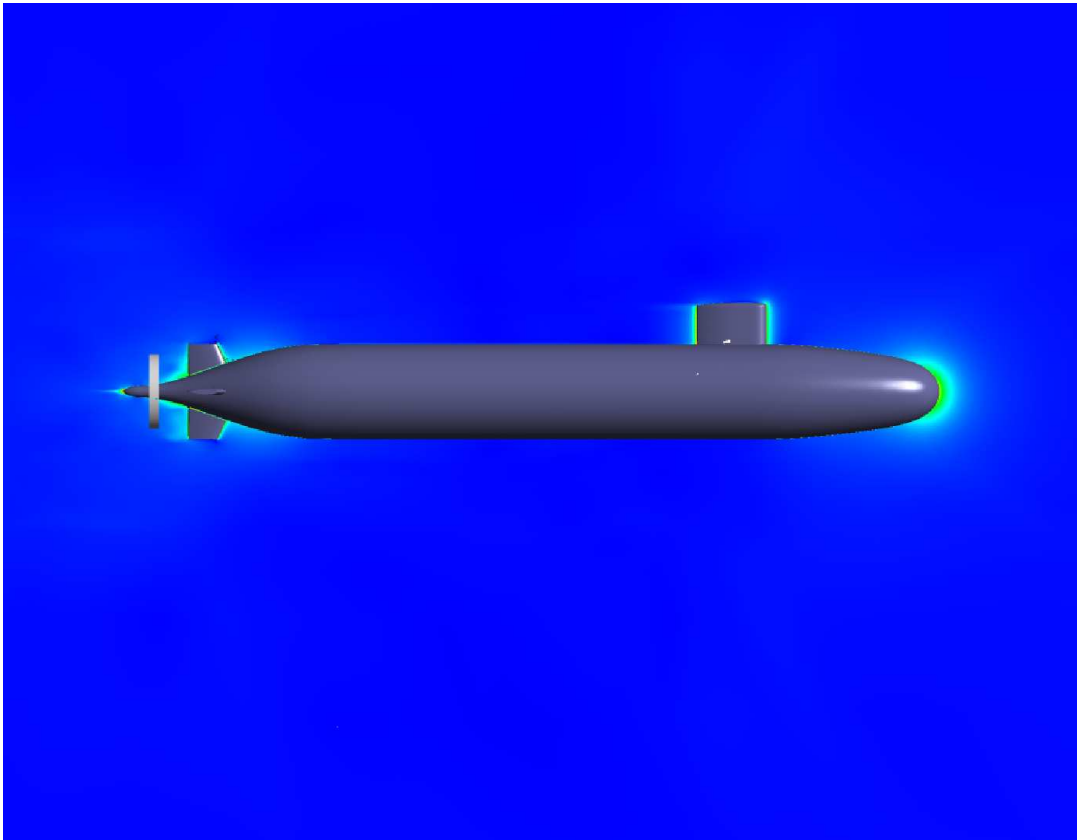


Abbildung 132: Geschwindigkeiten um eine Suboffgeometrie bei 0-Grad Ruderwinkel

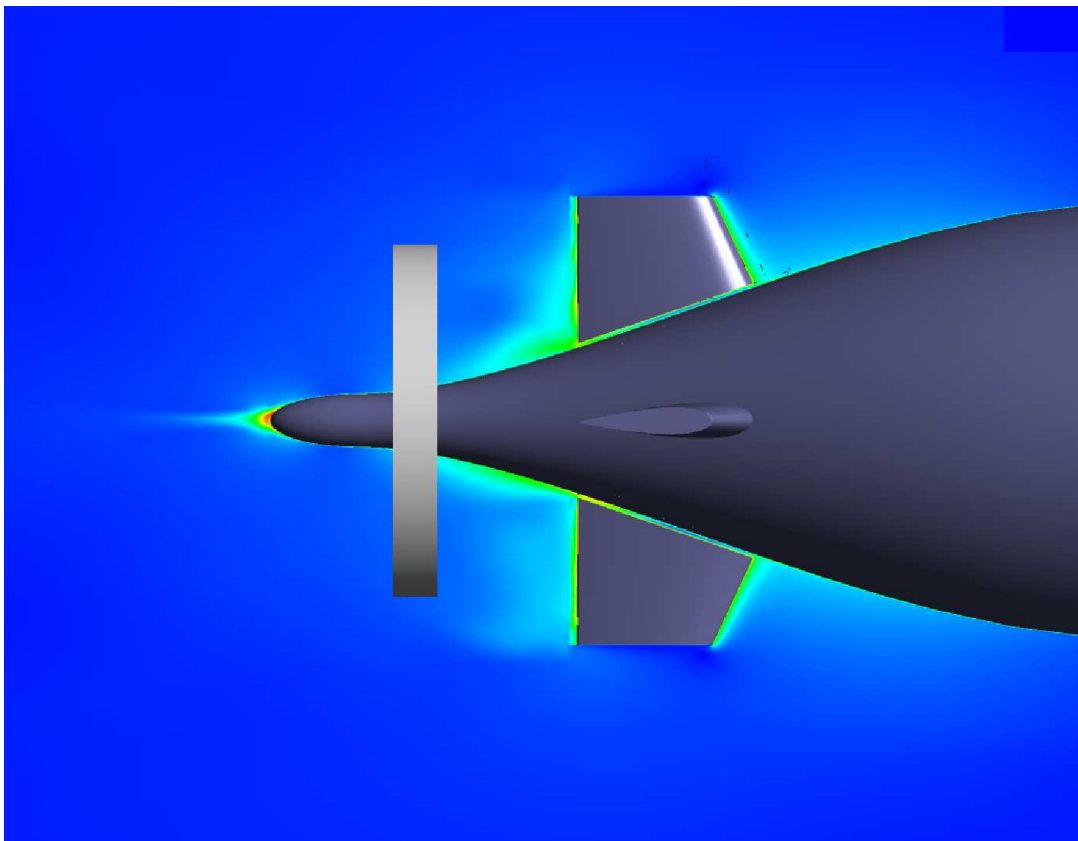


Abbildung 133: Geschwindigkeiten am Hinterschiff einer Suboffgeometrie bei 0-Grad Ruderwinkel

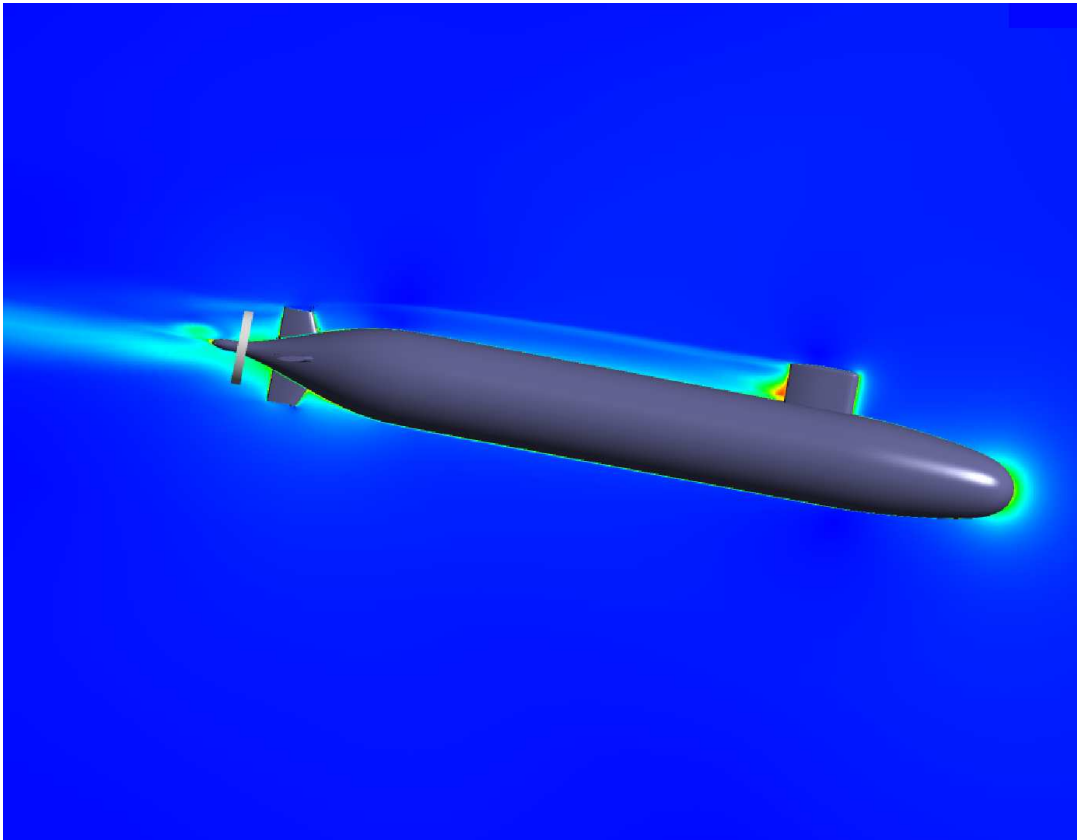


Abbildung 134: Geschwindigkeiten um eine Suboffgeometrie bei 10-Grad Ruderwinkel

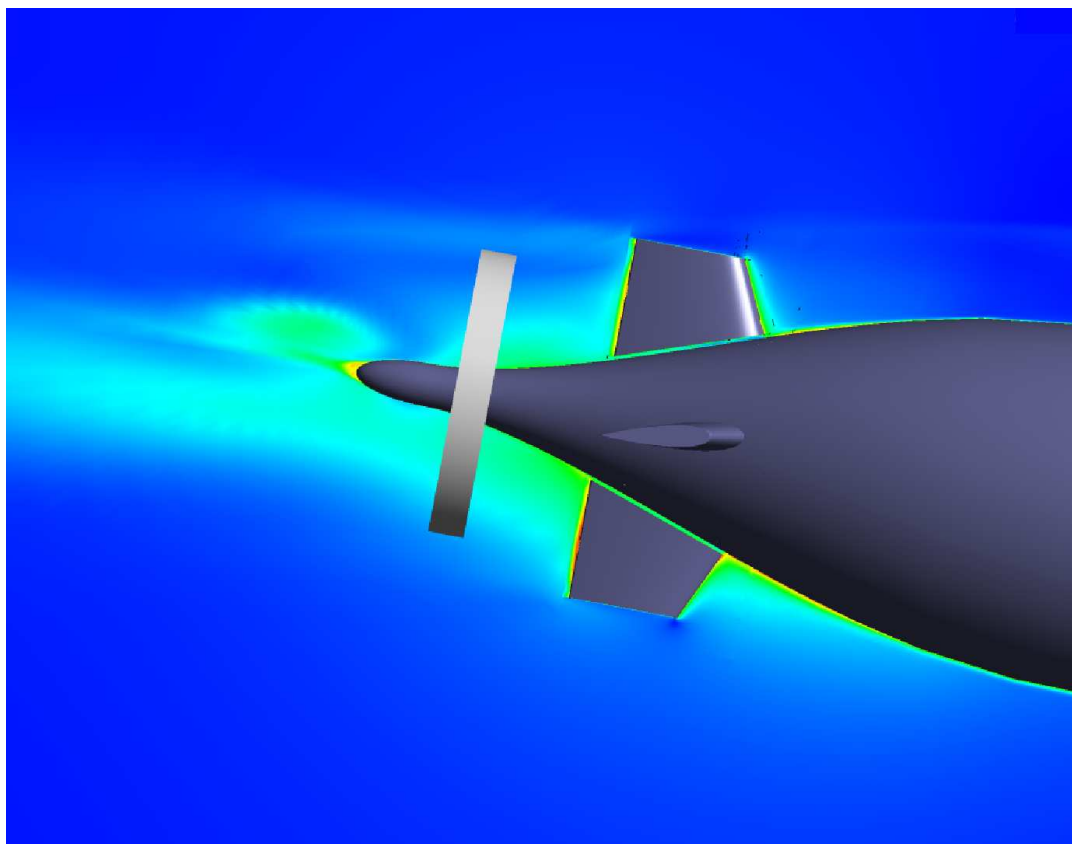


Abbildung 135: Geschwindigkeiten am Hinterschiff einer Suboffgeometrie bei 10-Grad Ruderwinkel

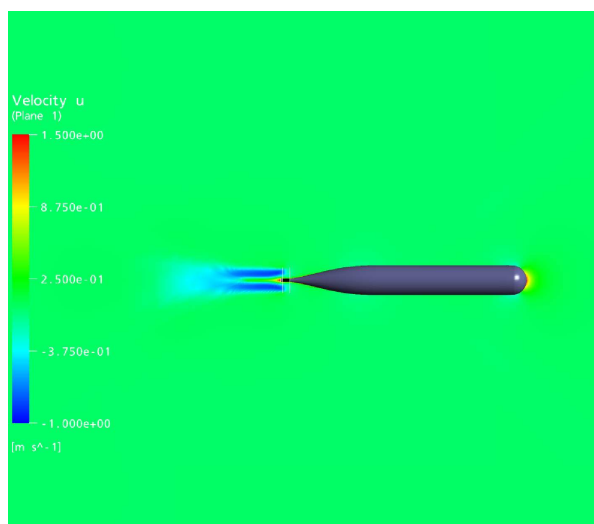


Abbildung 136: Axiale Geschwindigkeiten um die Testgeometrie

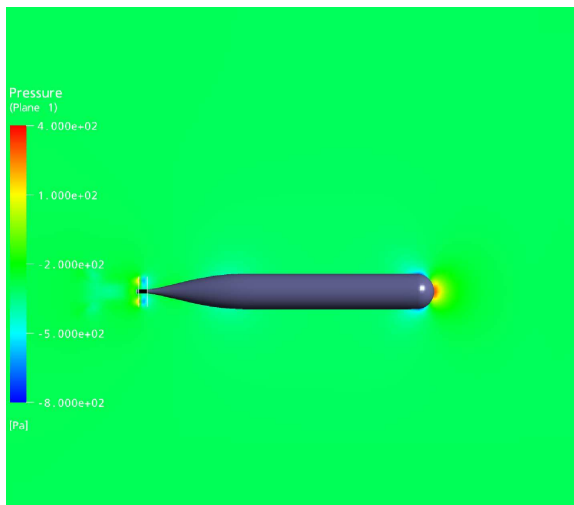


Abbildung 137: Druckverteilung um die Testgeometrie nach 75 Iterationen

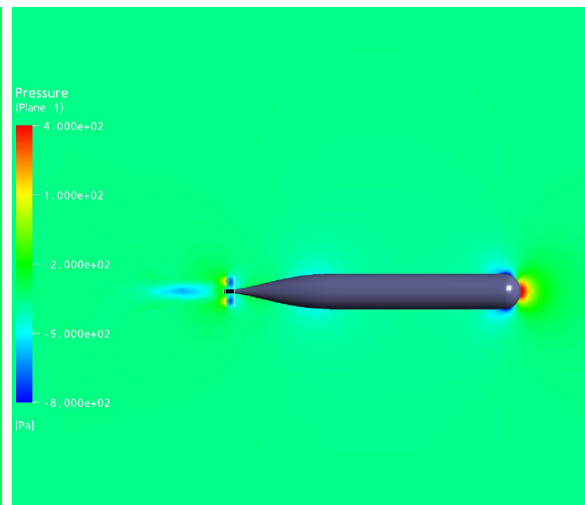


Abbildung 138: Druckverteilung um die Testgeometrie nach 190 Iterationen

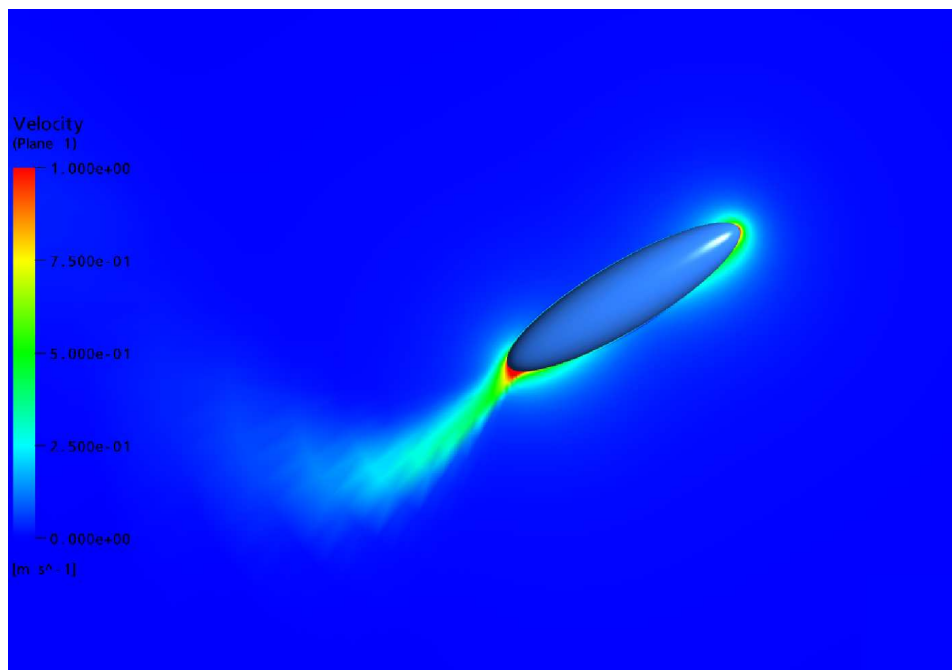


Abbildung 139: Geschwindigkeitsverteilung um ein Ellipsoid

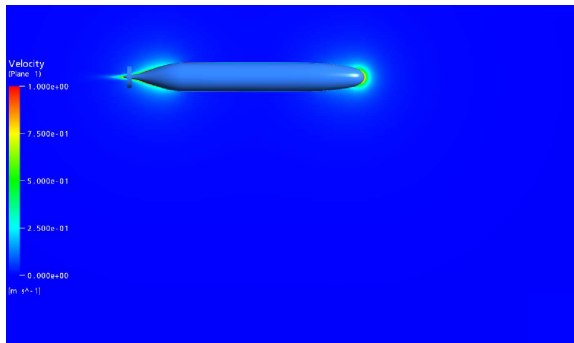


Abbildung 140: Geschwindigkeitsverteilung
um die Testgeometrie
nach 1 Sekunde

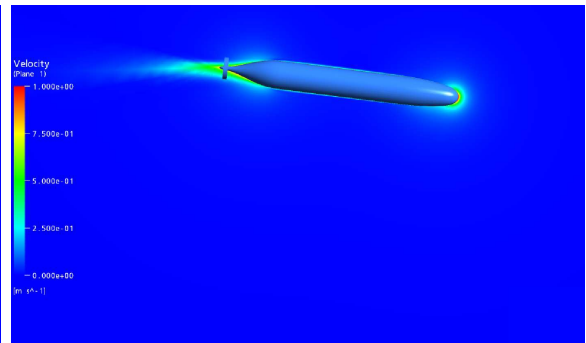


Abbildung 141: Geschwindigkeitsverteilung
um die Testgeometrie
nach 6 Sekunden

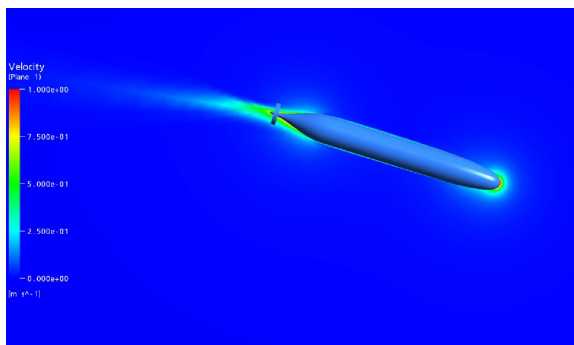


Abbildung 142: Geschwindigkeitsverteilung
um die Testgeometrie
nach 10 Sekunden

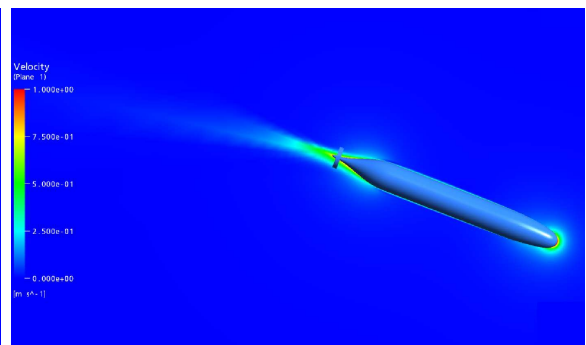


Abbildung 143: Geschwindigkeitsverteilung
um die Testgeometrie
nach 12 Sekunden

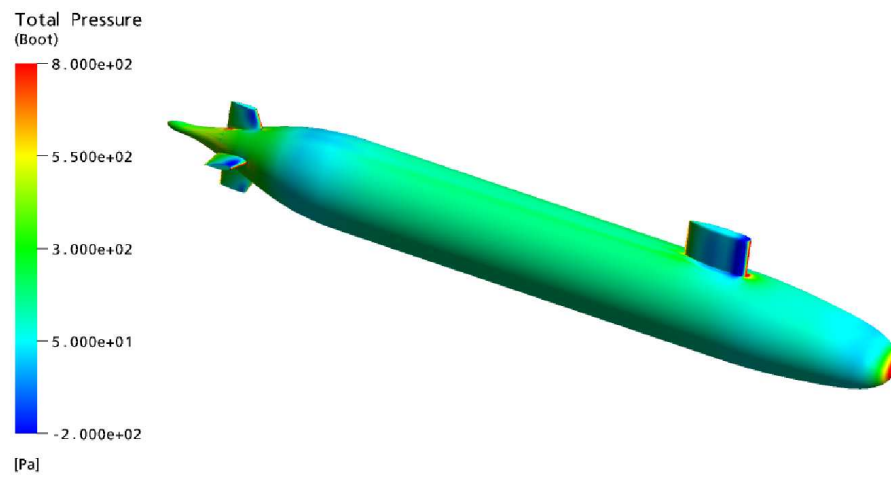


Abbildung 144: Druckverteilung am Rumpf nach 7 Sekunden

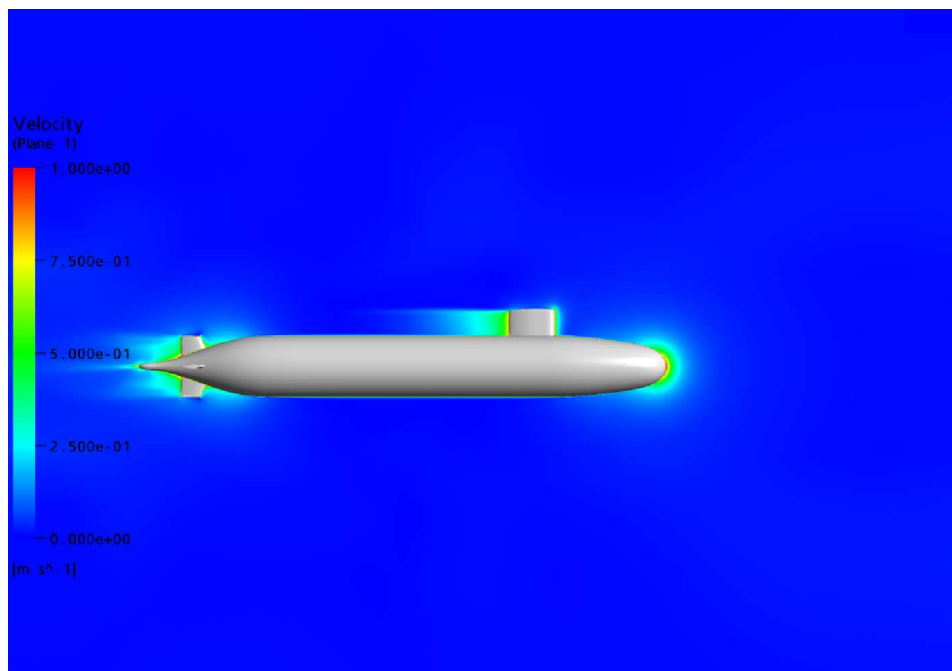


Abbildung 145: Geschwindigkeiten um den Rumpf nach 1 Sekunde

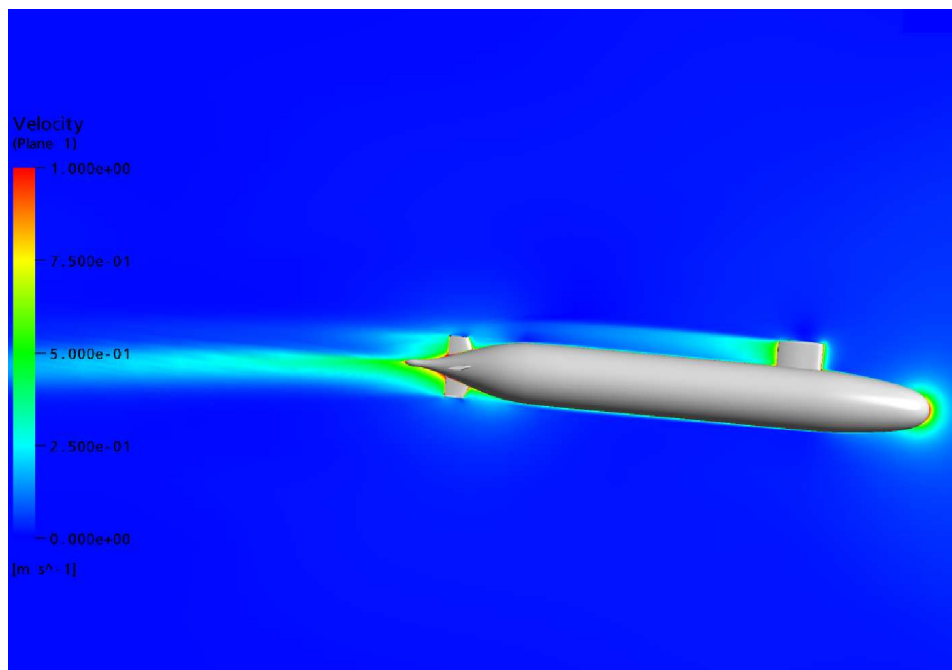


Abbildung 146: Geschwindigkeiten um den Rumpf nach 7 Sekunden

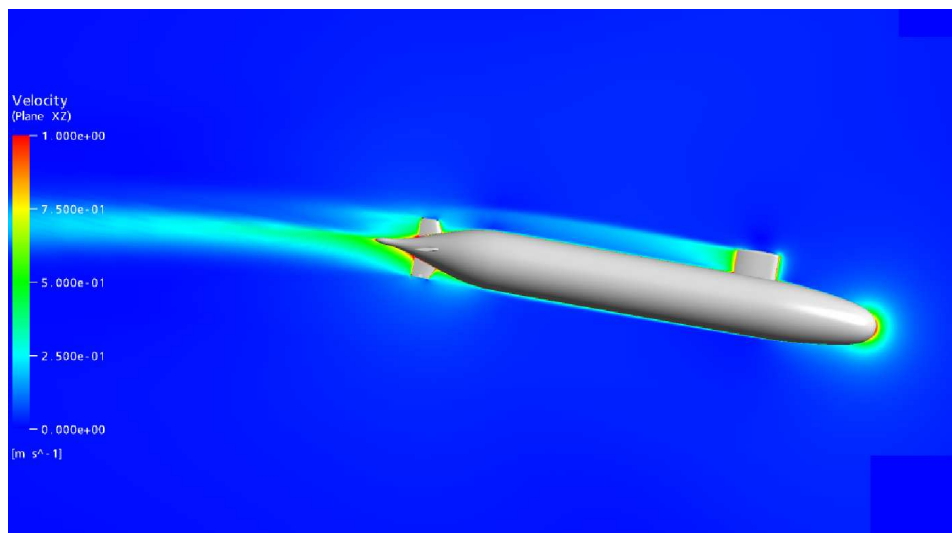


Abbildung 147: Geschwindigkeiten um den Rumpf nach 9,5 Sekunden

Literatur

- [1] Bull, P.; Watson, S.; The Scaling of High Reynolds Number Viscous Flow Predictions for Appended Submarine Geometries ; Twenty-Second Symposium on Naval Hydrodynamics; 2000
- [2] McDonald H.; Whitfield D.; Self-Propelled Maneuvering Underwater Vehicles; Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics 1997
- [3] Kruppa C.; Methodical cavitation test on blade sections. Three component forces and cavitation patterns. Vosper; Report no. 115; 1963
- [4] Ferziger J. H.; Perić M.; Computational Methods for Fluid Dynamics; Springer-Verlag; 1997
- [5] Ritterhoff, J.; Bußenius, J.; Eckel, C.; Ewerth, H.; Franitza, S.; Goesmann, H.; Philipp, J.; Psoma, A.; Reuter, J.; Sattler, G.; Stünzner-Karbe, S.; Thielk, B.; Die Entwicklung von militärischen Ubooten auf deutschen Werften, Handbuch der Werften Band 26, Schiffahrts-Verlag HANSA, 2002.
- [6] Lewandowski, E. M.; The dynamics of marine craft, Advanced Series on Ocean Engineering World Scientific Publishing, 2004
- [7] Klemt, M.; Bewegungssimulation schwimmender Körper in viskoser Strömung, TU Hamburg-Harburg Schriftenreihe Schiffbau, 2004
- [8] Abkowitz, M. A.; Stability and Motion Control of Ocean Vehicles, The M.I.T. Press, Massachusetts Institute of Technology, 1969
- [9] Kormiltisin, Y.N.; Khalizev, O.A.; Theory of Submarine Design, Riviera Maritime Media, Saint-Petersburg State Maritime Technical University, 2001
- [10] Newman, J.N.; Marine Hydrodynamics, Cambridge, MA:MIT Press, 1977
- [11] Bohlmann, H.J.; Berechnung hydrodynamischer Koeffizienten von Ubooten zur Vor-

- hersage des Bewegungsverhaltens, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 1990
- [12] Press, W. H.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W.T.; Flannery, B. P.; Numerical Recipes in Fortran 77, Cambridge University Press, 2003
- [13] Ferziger, J.H.; Perić., Computational Methods for Fluid Dynamics 3rd Edition, Springer-Verlag, Berlin, 2002
- [14] Xing-Kaeding, Y.; Unified Approach to Ship Seakeeping and Maneuvering by a RANSE Method, TU Hamburg-Harburg Schriftenreihe Schiffbau, 2006
- [15] AEA Techmology, User Documentation Vol. 4, CFX5.5 User Manual , 2002
- [16] Andrew, A.G.; Six-DOF CFD Simulations for Rising Stability Predictions: Software Design, Powerpoint Presentation, University of New Brunswick, 2004
- [17] Stuntz, Henn, Jiang, Steffen, Hänel, Vilsmeier, Simulationssoftware für hydrodynamische Probleme- Schiff und Antrieb in begrenzten Gewässern, Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST), Bericht 295, WWW-Veröffentlichung
- [18] Hidajet, H.; Development and Application of Finite Volume Method for the Computation of Flows Around Moving Bodies on Unstructured, Overlapping Grids, TU Hamburg-Harburg Schriftenreihe Schiffbau, 2006
- [19] Stuntz, N.; Numerische Simulation der Schiffsumströmung mit Berücksichtigung des Propellersogs, Universität Duisburg-Essen, Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme, 2005
- [20] Gabler, U.; Unterseebootbau, Verlag Bernard und Graefe, 1996
- [21] Jacquin, E.; Guillerm, P.-E.; Drouet, A.; Perdon, P.; Alessandrini, B.; Simulation of unsteady ship maneuvering using free-surface RANS solver, 26th Symposium on Naval Hydrodynamics, 2006

- [22] Mueller, S.-B.; Steden, M.; Neugebauer, J.; El-Haddad, M.-F.; Abdel Maksoud, M.; Comparing a Propeller Model with a Rotating Propeller in a CFD-Simulation of the Viscous Flow around a Ship, University of Duisburg-Essen, Institute of Ship Technology and Transpot Systems, 2006
- [23] Skrzypczak, T., Abdel-Maksoud, M.; Realisierung der Ruderbewegung, Universität Duisburg-Essen, Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme, unveröffentlicher Bericht, 2006
- [24] Steden, M.; Skrzypczak, T.; Abdel-Maksoud, M.; Wolf, E.; Simulation of Submarine Manoeuvres using CFD, Universität Duisburg-Essen, Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme, Howaldtswerke Deutsche Werft GmbH, Underwater Defence Technology, Hamburg, 2006
- [25] Gertler, M.; Hagen, G.R.; Standard Equations of Motion for Submarine Simulation. NSRDC-Report SR 009 01 01, Task 102, 1967
- [26] Feldmann, J.; Revised Standard Submarine Equations of Motion, DTNSRDC- Report SPD-0393-09, 1979
- [27] Müller, S.-B.; Abdel-Maksoud, M.; Numerische Untersuchung der hydrodynamischen Eigenschaften eines Propellerentwurfs, Universität Duisburg-Essen, Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme, unveröffentlicher Bericht, 2005
- [28] Hachmann, T.; Abdel-Maksoud, M.; Numerische Untersuchung der hydrodynamischen Eigenschaften eines Propellerentwurfs im Nachstrom eines Unterwasserschiffes mit Vordrallrudern, Universität Duisburg-Essen, Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme, unveröffentlicher Bericht, 2006
- [29] Müller, S.-B.; Abdel-Maksoud, M.; Einfluss der Reynoldszahl auf die Kennwerte von Propellern, Universität Duisburg-Essen, Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme, STG, Berlin, 2005
- [30] Bellevre, D.; Diaz de Tuesta, A.; Perdon, P.; Submarine manoeuvrability as-

- essment using Computational Fluid Dynamic tools, Twenty-Third Symposium on Naval Hydrodynamics, 2001
- [31] Bull, P.; Watson, S.; The Scaling of High Reynolds Number Viscous Flow Predictions for Appended Submarine Geometries, Defence Evaluation and Research Agency, UK, Twenty-Second Symposium on Naval Hydrodynamics, 2000
- [32] McDonald, H.; Whitfield, D.; Self-Propelled Maneuvering Underwater Vehicles, Pennsylvania State University, Mississippi State University, USA, Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics, 1997
- [33] Sung, C.-H.; Fu, T.-C.; Griffin, M.; Huang, T.; Validation of incompressible flow computation of forces and moments on axisymmetric bodies undergoing constant radius turning, David Taylor Model Basin, USA, Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics, 1997
- [34] Bull, P.; The validation of CFD predictions of nominal wake for the SUBOFF fully appended Geometry, Defence Research Agency, UK, Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics, 1997
- [35] Purtell, Patrick, L.; Unsteady Hydrodynamics of the Maneuvering Submarine (A), Office of Naval Research, Arlington VA 22217, 2000
- [36] Pankajakshan, R.; Remotigue, M. G.; Taylor, L. K.; Jiang, M.; Briley, W. R. ; Whitfield, D. L.; Validation of Control-Surface Induced Submarine Maneuvering Simulations using UNCLE, Computational Simulation and Design Center, Mississippi State University, USA, Twenty-Fourth Symposium on Naval Hydrodynamics, 2002
- [37] Sung, C.-H.; Jiang, M.-Y., Rhee, B.; Precival, S.; Atsavapranee, P.; Koh, I.-Y.; Validation of the flow around a turning submarine, David Taylor Model Basin, USA, Twenty-Fourth Symposium on Naval Hydrodynamics, 2002
- [38] Bertram, V.; Practical ship hydrodynamics, Verlag Butterworth Heinemann, 2002

- [39] Abdel-Maksoud, M.; Wuttke, H.; Menter, F.; Numerische Berechnung der viskosen Strömung an einem rotierenden Propeller im Nachstrom eines Schiffes, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH, Schlußbericht für das Forschungsvorhaben 1013, 1997
- [40] Purtell, Patrick, L.; Unsteady Hydrodynamics of the Maneuvering Submarine (B), Office of Naval Research, Arlington VA 22217
- [41] Sieber, Rolf; Numerische Simulation technischer Strömungen mit Fluid-Struktur-Kopplung, TU Darmstadt FB Maschinenbau, Darmstadt 2002
- [42] Steden, M., Skrzypczak, T., Hundemer, J., Abdel-Maksoud, M.; Erstellung eines vereinfachten Propellermodells für die Durchführung der Bewegungssimulation von U-Booten auf Basis von instationären, viskosen Berechnungsverfahren, Universität Duisburg-Essen Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme, unveröffentlichter Bericht, 2007
- [43] Lewis, E.; Principles of Naval Architecture, Vol.II, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, NJ, USA, 1988
- [44] Schneider, M.; Stabilised Explicit Rigid Body Motion, ANSYS-Germany, Otterfing, interne Präsentation, Mai 2005